

SÉRIE A, N° 2291

N° D'ORDRE : 3863

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES NATURELLES

PAR

Claude LALOU

1^{re} THÈSE. — Etude expérimentale de la production de carbonates
par les bactéries des vases de la Baie de Villefranche.

2^e THÈSE. — Propositions données par la Faculté.

Soutenues le 25 mars 1955, devant la Commission d'examen.

MM. LUTAUD, *Président.*

BOURCART, }
PRENANT, } *Examineurs.*
WYART, }

MASSON & C^{ie}, ÉDITEURS
LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE
120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, PARIS (VI^e)

1957

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté :

REMONTÉE DE LA FAUNE BATHYPÉLAGIQUE DANS LA BAIE DE VILLEFRANCHE-SUR-MER

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 20 mars 1955.

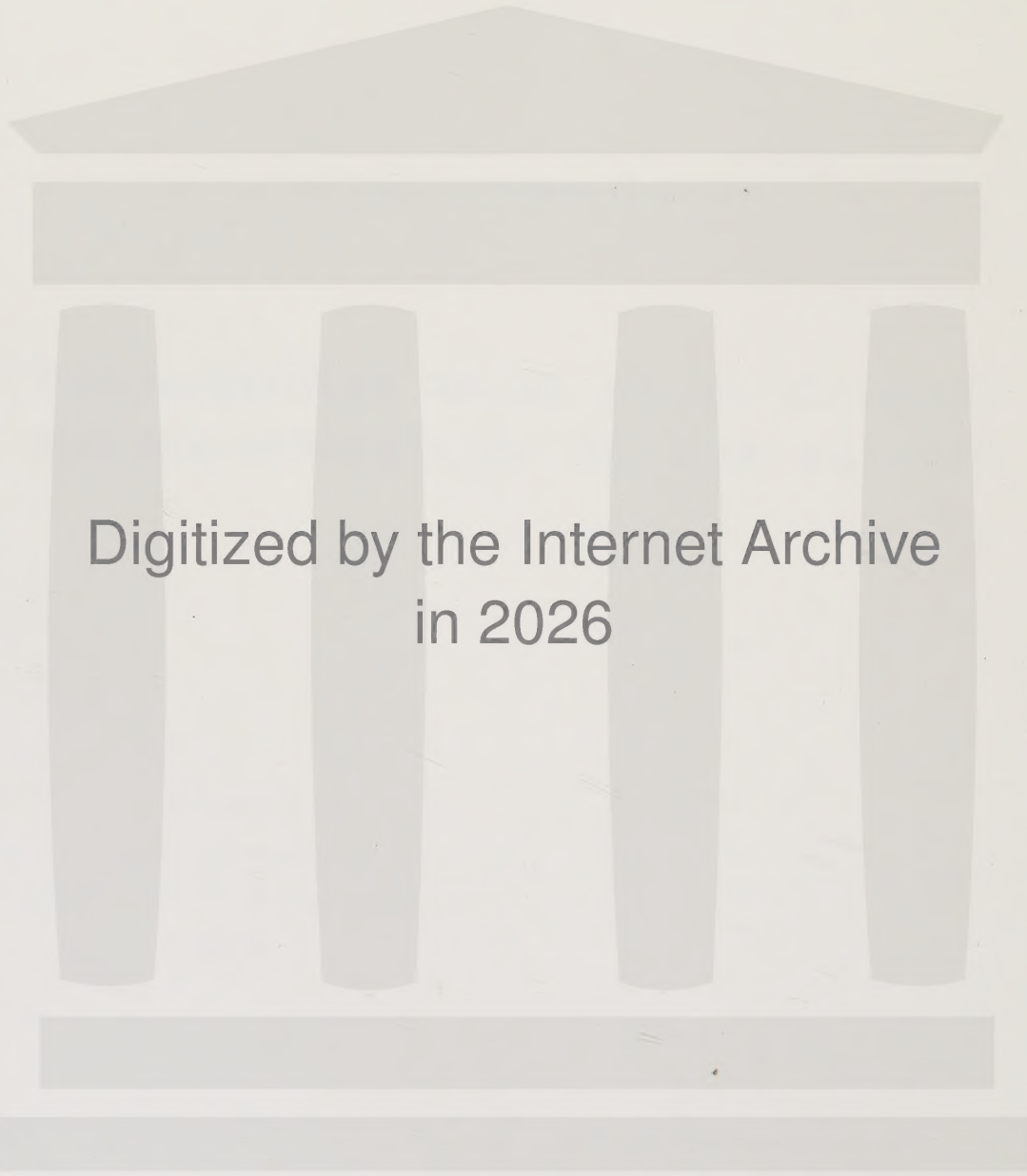
Le Doyen de la Faculté des Sciences,

J. PÉRÈS.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

JEAN SARRAILH.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41552212_0063

SÉRIE A, N° 2291

N° D'ORDRE : 3863

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES NATURELLES

PAR

Claude LALOU

1^{re} THÈSE. — Etude expérimentale de la production de carbonates
par les bactéries des vases de la Baie de Villefranche.

2^e THÈSE. — Propositions données par la Faculté.

Soutenues le 25 mars 1955, devant la Commission d'examen.

MM. LUTAUD, *Président.*

BOURCART, }
PRENANT, } *Examineurs.*
WYART, }

MASSON & C^{ie}, ÉDITEURS
LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE
120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, PARIS (VI^e)

1957

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

Doyen..... J. PÉRÈS.

PROFESSEURS

G. JULIA.....	T	Analyse supérieure et Algèbre supérieure.	JANET	T	Méc. anal. et méc. céleste.
E. DARMOIS ..	T	Enseignement de Physique.	PETIT	T	Biologie maritime.
ROBERT LÉVY. T		Physiologie comparée.	QUENEY	T	Météorologie et Dynamique atmosphérique.
FOCH	T	Mécan. phys. et expér.	GALLIEN	T	Embryologie.
PAUTHENIER ..	T	Electrotechnique générale.	EICHHORN	T	Biologie végétale (P. C. B.).
DE BROGLIE ..	T	Théories physiques.	DE CUGNAC		Biologie végétale (P. C. B.).
JOB	T	Chimie générale.	M ^{lle} CAUCHOIS. T		Chimie-Physique.
PRENANT	T	Anat. et Histol. comp.	THELLIER	T	Physique du globe.
GARNIER	T	Géométrie supérieure.	AUDUBERT	T	Electrochimie.
PÉRÈS	T	Mécanique des fluides et applications.	L'HÉRITIER ...	T	Génétique.
LAUGIER	T	Physiologie générale.	GRIVET	T	Radio-Electricité.
M. CURIE	T	Physique (P. C. B.).	PONCIN	T	Mécanique des fluides.
BARRABÉ	T	Géologie structurale et Géologie appliquée.	THIRY	T	Mécanique appliquée.
G. DARMOIS ..	T	Calcul des probabilités et Physique mathématique.	DUBREIL	T	Arithmétique et théorie des nombres.
Jacques BOURCART...	T	Géographie physique et Géologie dynamique.	QUELET	T	Chimie organique.
M ^{me} JOLIO-CURIE...	T	Physique nucléaire et Radioactivité.	CAGNIARD	T	Géophysique appliquée.
PLANTEFOL ...	T	Botanique.	CHAMPETIER ..	T	Chimie macromoléculaire.
CABANNES	T	Recherches physiques.	CUVILLIER	T	Géologie structurale et Géologie appliquée.
GRASSÉ	T	Evol. des êtres organisés.	JUNG	T	Pétrographie.
PRÉVOST	T	Chimie organique.	TRILLAT	T	Chimie physique.
BOULIGAND ...	T	Application de l'analyse à la Géométrie.	WIEMANN (M. P. C.).	T	Chimie (M. P. C.).
CHAUDRON ...	T	Chimie appliquée.	JACQUINOT ...	T	Spectroscopie et physique céleste.
WYART	T	Minéralogie.	VASSY		Physique de l'atmosphère
TEISSIER	T	Zoologie.	DESTOUCHES...		Théories physiques.
MANGENOT	T	Biologie végétale.	M. PRUVOST... T		Géologie.
P. AUGER	T	Physique quantique et relativité.	AMIEL	T	Chimie (P. C. B.).
MONNIER	T	Physiol. des fonctions.	HOCART	T	Minéralogie.
PIVETEAU	T	Géologie.	J.-P. MATHIEU. T		Physique (P. C. B.).
ROCARD	T	Physique (E. N. Sup.).	COUTEAUX	T	Biologie animale (P. C. B.).
H. CARTAN ...	T	Mathématiques (E.N.Sup.).	MAY		Biologie animale (P.C.B.).
LAFFITTE	T	Chimie générale.	CHOSQUET	T	Calc. diff. et intégral.
FAVART	T	Mécanique générale.	FELDMANN		Biologie (P. C. B.).
COULOMB	T	Physique du globe.	GUINIER	T	Physique (P. C. B.).
M ^{lle} COUSIN... T		Biol. anim. (P. C. B.).	JOST	T	Biologie (P. C. B.).
CHRÉTIEN ...	T	Chimie minérale.	FORTET	T	Calc. des probabilités.
DRACH	T	Zoologie.	SCHWARTZ ...	T	Méth. Math. de la Phys.
KASTLER	T	Physique.	CHOUARD	T	Physiologie végétale.
EPHRUSSI	T	Génétique.	MALAVARD	T	Aviation.
WURMSER	T	Biologie phys.-chimique.	BRELOT	T	Calcul différentiel.
RIVIÈRE	T	Géologie (S. P. C. N.).	NORMANT	T	Chimie (P. C. B.).
GAUTHERET ...	T	Biol. végét. (P. C. B.).	BÉNARD		Chimie (P. C. B.).
LUCAS	T	Physique.	BUVAT		Botanique (E. N. S.).
A. THOMAS... T		Biologie cellulaire.	DUGUÉ	T	Statistiques mathémat.
ARNULF	T	Optique appliquée.	GELOSO		Chimie (S. P. C. N.).
MAX MORAND.. T		Physique.	SOULAIRAC ...	T	Psychophysiologie.
SOLEILLET ...	T	Physique.	ULRICH		Physiologie végétale.
FORTIER	T	Mécan. expér. des fluides.	MARÉCHAL ...	T	Optique théor. et appl.
DANJON	T	Astronomie.	KIRRMANN	T	Théories chimiques.
FROMAGEOT ...	T	Chimie biologique.	CHADEFAUD ...		Botanique.
LAPORTE	T	Physiq. génér. et Radio-activité.	DESTRIAU		Physique (M. P. C.).
			M ^{lle} LE BRETON.		Physiologie générale.
			SALEM		Mathématiques générales.
			ESCLANGON ...	T	Physique (P. C. B.).
			LELONG	T	Mathématiques générales.

Secrétaire général..... C. MONIER.

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE
DE LA
PRODUCTION DE CARBONATES
PAR LES
BACTÉRIES DES VASES DE LA BAIE
DE
VILLEFRANCHE-SUR-MER ⁽¹⁾

PAR

CLAUDE LALOU

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE

I. — INTRODUCTION.....	202
II. — ÉTUDE DES SÉDIMENTS.....	207
a) Méthodes analytiques	207
b) Répartition des sulfures dans les sédiments.....	208
c) Répartition des carbonates dans les sédiments.....	210
d) Répartition du carbone organique dans les sédiments.....	213
III. — VARIATIONS AU COURS DE LA CONSERVATION.....	213

DEUXIÈME PARTIE

I. — HISTORIQUE.....	214
II. — PRÉCIPITATION EXPÉRIMENTALE DES CARBONATES EN CULTURES AQUARIUM.....	216
1. Généralités	216
2. Variation des différents facteurs.....	223

(1) Thèse soutenue devant la Faculté des Sciences de Paris, le 25 mars 1955.

3. Rôle du CO ₂	235
4. Effets de la stérilisation	237
5. Etude de sédiments d'origines diverses.....	238

TROISIÈME PARTIE

I. — ETUDE AU MICROSCOPE DES DIFFÉRENTS VOILES.....	242
1. Variations d'un voile au cours de sa formation.....	242
2. Variation des voiles en fonction des différents modes de productivité	246
II. — ETUDE AUX RAYONS X.....	261
CONCLUSIONS	262
BIBLIOGRAPHIE	264
EXPLICATION DES PLANCHES	267

PREMIÈRE PARTIE

I. — INTRODUCTION

Travaillant depuis plusieurs années dans le laboratoire de Géologie sous-marine de la Sorbonne, sous la direction de M. le Professeur J. BOURCART, c'est à lui que je dois le sujet du présent travail. Ayant décidé de me spécialiser dans la bactériologie marine, il me proposa d'étudier le cycle des sulfures et des sulfates dans la baie de Villefranche-sur-Mer, sur laquelle il était lui-même en train de préparer une importante monographie.

L'importance des activités bactériennes dans le cycle du soufre dans les sédiments marins a été soulignée par GALLIHER (1933). ZOBELL (1946), dans son traité de microbiologie marine, donne les principales étapes du cycle du soufre et indique quelles sont les bactéries qui en sont responsables. Etant donnée l'orientation de ce travail, il nous suffira de noter les processus suivants, tels qu'ils ont été résumés par ZOBELL : la libération du soufre à partir des composés organiques par les bactéries peut être considérée comme universelle et non spécifique. La décomposition des restes animaux ou végétaux donne généralement une libération d'H₂S. Une aération abondante semble permettre à beaucoup de bactéries actives dans la décomposition des protéines de transformer le soufre directement en sulfate au lieu de H₂S.

Les bactéries qui réduisent les sulfates sont très abondamment distribuées dans la mer. L'absence d'oxygène libre, la présence de sulfates et la présence de matière organique sont les besoins essentiels pour l'activité des bactéries réduisant les sulfates; l'activité de telles bactéries est responsable de l'accumulation d'H₂S dans les eaux stagnantes. D'autre part, il existe aussi, en grand nombre, des bactéries oxydantes du soufre et de ses composés, soit des bactéries achromatiques, soit des Rhodobactéries.

D'après certains auteurs, comme BAVENDAMM (1932), les réducteurs de sulfate pourraient avoir une action dans la précipitation du carbonate de calcium dans certaines conditions. Cette précipitation faisant l'objet de la seconde partie de ce travail, je discuterai plus loin les diverses hypothèses qui ont été émises. Mais, dès maintenant, on peut considérer que la répartition des sulfures, de la matière organique, et peut-être du calcaire, est un problème plus bactériologique que chimique. C'est pourquoi, avant d'aborder l'étude expérimentale de ces différents cycles, il est intéressant d'étudier ce problème dans la nature, en l'occurrence dans la baie de Villefranche-sur-Mer (Alpes-Maritimes).

Position géographique.

Dans la monographie citée plus haut, J. BOURCART donne une description très détaillée de la baie de Villefranche; j'en résumerai ici les grands traits :

La baie de Villefranche, située sur la côte méditerranéenne de la France, entre Nice et Monaco, par 43°42 Nord et 7°19 Est de Greenwich, a été choisie comme lieu de recherches pour plusieurs raisons :

En premier lieu, de par sa configuration, elle présente une unité géographique bien déterminée. D'une largeur moyenne de 3/4 de mille et d'une longueur moyenne de 2 milles 1/2, elle est limitée vers le large, à l'Ouest par les rochers de Nice, et à l'Est par le cap Ferrat. Son ouverture vers le large, resserrée entre ces deux promontoires, et sa protection montagneuse du côté de la terre la mettent à l'abri des grandes tempêtes, et en font une « sediment trap » remarquable. Elle présente, au Nord, une zone étroite et peu profonde, suivie d'un élargissement considérable; elle atteint sa largeur maximum de 1 mille sur un alignement Darse/baie de l'Esplanador; à cet élargissement fait suite un rétrécissement très marqué, sur l'alignement Pointe-Madame/Pointe-Pilone, où la largeur est réduite à 1/2 mille.

La topographie sous-marine en est assez simple; le rétrécissement du fond de la baie correspond à une sorte de cuvette à fond plat de 16 à 18 m. Elle est occupée par une vase noire à forte odeur d'H₂S, qui sera spécialement étudiée au cours de ce travail, et par l'herbier. Puis, à partir de l'élargissement, les profondeurs augmentent régulièrement jusqu'à la ligne de 50 m qui sépare grossièrement la zone d'herbier de la zone de vases profondes.

D'après les sondages que nous (1) avons pu effectuer à bord de l'avis de recherches de la Marine nationale, *Ingénieur Elie-Monnier*, il ne semble pas que l'on puisse voir ici le départ d'une rivière sous-marine; mais les bandes de sondages mettent tout de même en évidence une fente très profonde et très étroite, située dans l'axe de la baie et qui permet d'atteindre très rapidement vers le large des fonds de 350 à 400 m.

Aucune rivière n'apporte d'eau douce dans cette baie. Les cartes données figures 1 et 1 bis montrent, d'une part, le relief de la baie de Villefranche (les courbes sont données de 5 m en 5 m), et, d'autre part, la distribution générale des fonds. Cette carte a été dressée d'après des minutes du service Hydrographique de la Marine, d'après les sondages de J. BOURCART, et d'après mes propres sondages.

La seconde raison importante de ce choix a été l'existence, à Villefranche même, d'un Laboratoire de Zoologie de l'Université de Paris, ce qui me permettait d'effectuer

(1) Mission d'avril 1952. J. BOURCART, chef de Mission, L. BERTHOIS, C. LALOU à bord de l'*Elie-Monnier*, commandant L. V. G. HOUOT.

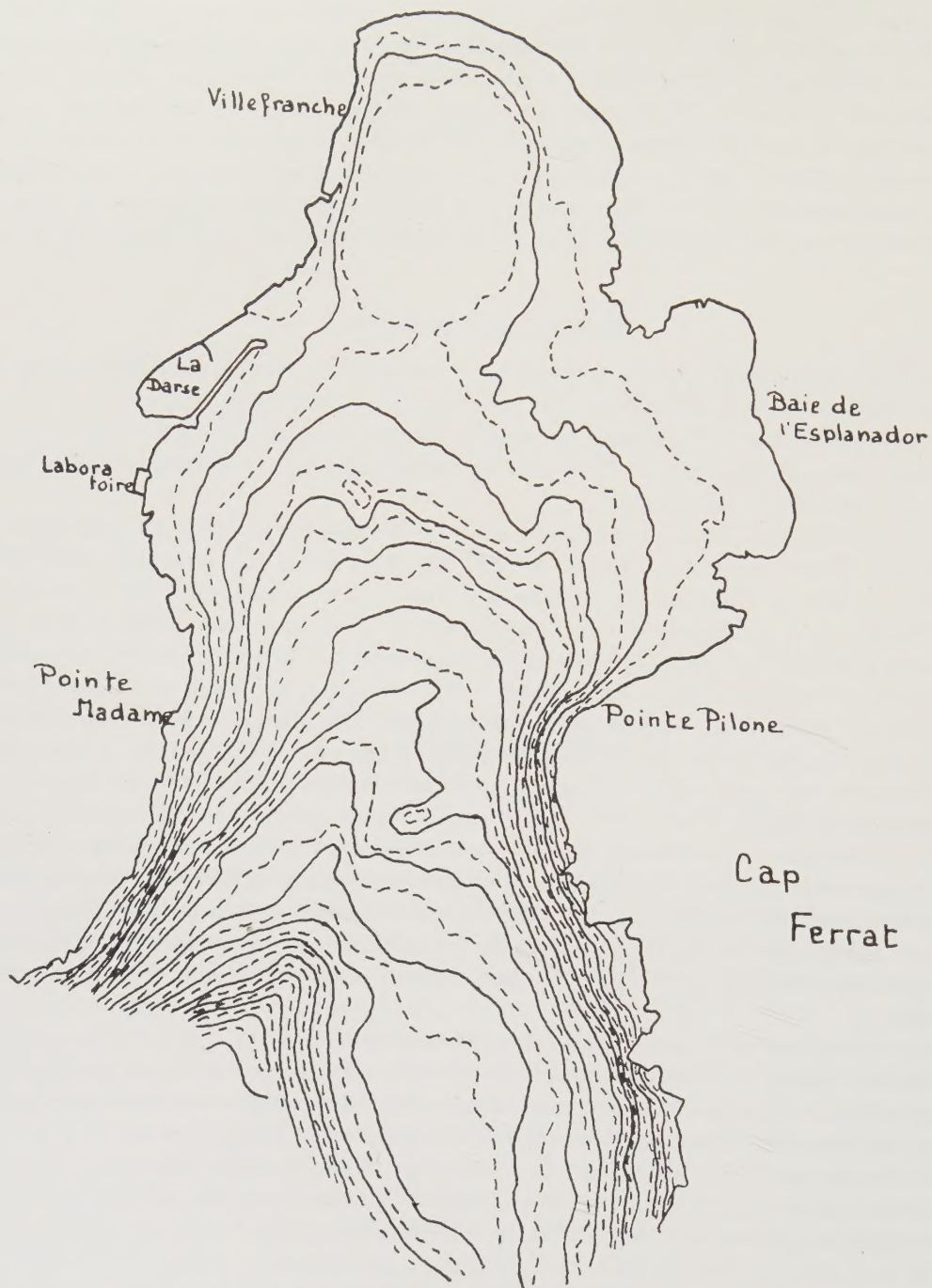


FIG. 1. — Baie de Villefranche. Topographie sous-marine.
(Equidistance des courbes : 5 m.)

les analyses chimiques et bactériologiques dans les meilleures conditions possibles. En effet, il a été établi par de nombreux océanographes, biologistes et bactériologistes que les sédiments ou les eaux conservés un certain temps dans les bocaux de récolte subis-

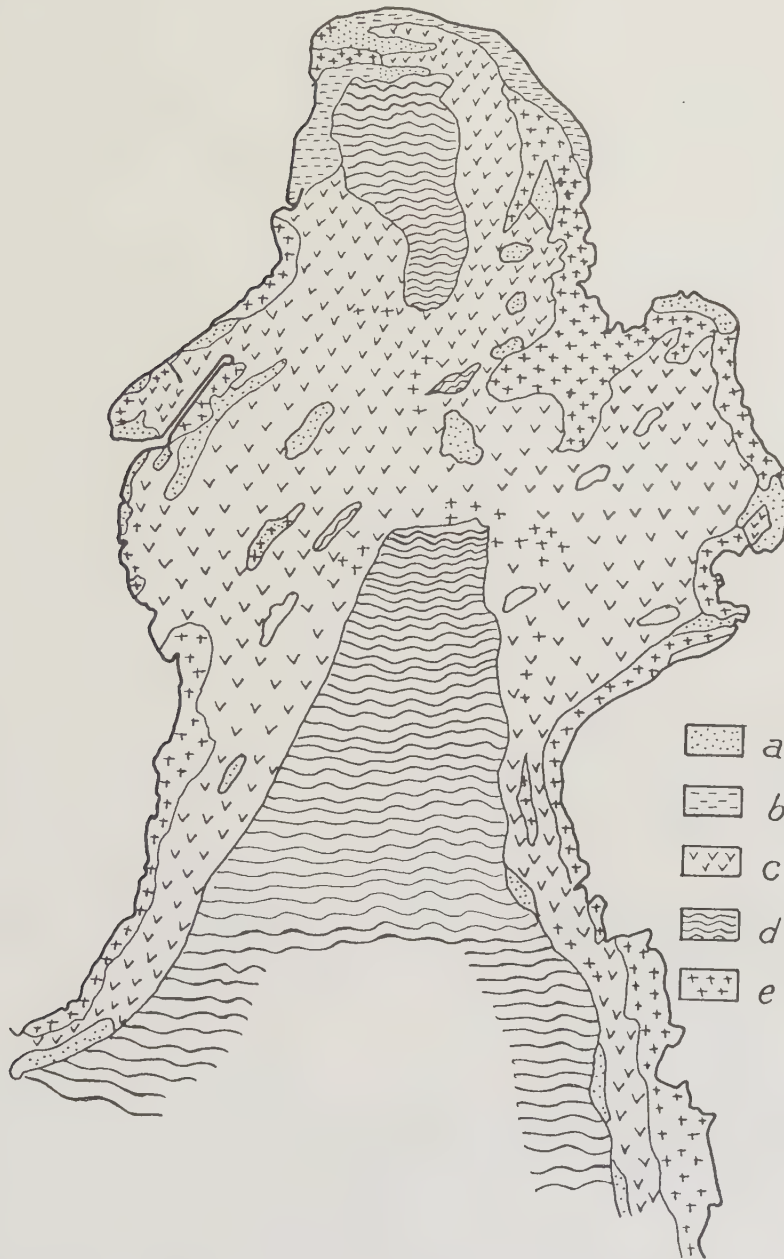


FIG. 1 bis. — Baie de Villefranche. Lithologie.
(a, sable; b, galets sur sable; c, herbier sur brouno; d, vase; e, roche.)

saient de nombreux changements dans leurs constituants chimiques et biologiques. La proximité du Laboratoire m'a permis d'effectuer toutes les expériences sur les parties en évolution constante dans les échantillons, dans les deux heures qui avaient suivi leur récolte, ce qui m'a permis de simplifier les méthodes de récolte, une tolérance de six heures est accordée par les méthodes standards américaines d'étude des eaux pour les eaux très polluées et de douze heures pour les eaux peu polluées.



Ce m'est un agréable devoir de remercier les différentes personnalités scientifiques qui ont, plus ou moins directement, encouragé ce travail. Il ne s'agit pas, dans mon cas, d'un simple hommage de politesse. Je suis très sincèrement heureuse de pouvoir acquitter ici une partie des dettes de reconnaissance que j'ai accumulées depuis le début de ma carrière scientifique, et même avant...

En effet, la première personne qui doit trouver ici l'expression de ma profonde gratitude est M^{lle} J. Caillière, Professeur d'Histoire et Géographie au Lycée Fénélon, qui a su, en une année d'enseignement vivant de Géographie générale, déterminer l'orientation de mon avenir.

M. JACQUES BOURCART, Professeur à la Sorbonne, a bien voulu m'accepter dans son Laboratoire alors que j'ignorais tout de la Recherche Scientifique. Sous sa direction, et entraînée par l'équipe enthousiaste qu'il avait su réunir autour de lui, j'ai pu être initiée à toutes les méthodes utilisées dans l'océanographie, profitant également de l'expérience de CLAUDE FRANCIS-BŒUF, de B. BRAJNIKOF, de B. RAJCEVIC ou de V. ROMANOVSKY. Que M. BOURCART veuille bien trouver ici le témoignage de ma grande reconnaissance et de ma respectueuse affection. Les membres de cette première équipe ont depuis lors suivi des voies différentes; mais nous avons tous été également émus par la mort tragique de CLAUDE FRANCIS-BŒUF, qui nous a privés d'un ami et d'un conseiller efficace.

Que M. LUTAUD, Directeur du Laboratoire de Géographie physique, accepte mes remerciements pour avoir toujours suivi avec bienveillance mes travaux durant la période où M. BOURCART était mobilisé, et pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse.

M. PRENANT, Professeur d'Anatomie comparée à la Sorbonne, et M. WYART, Professeur de Minéralogie, en acceptant de faire partie du jury de cette thèse, s'engageaient à suivre l'évolution de mes travaux et à m'aider de leurs conseils; ils l'ont fait avec tellement de gentillesse que je ne saurais trop leur redire ma profonde gratitude.

Une grande partie de ce travail a été effectuée à la Station Zoologique de Villefranche-sur-Mer. C'est pour moi un plaisir de remercier son Directeur, M. TRÉGOUBOFF, pour l'excellent accueil qu'il m'a toujours réservé dans son Laboratoire. Je n'aurai garde d'oublier, dans ce même Laboratoire, M. RAIBAUD, marin et homme à tout faire, dont j'ai pu apprécier l'inépuisable complaisance.

M. FAGE, Membre de l'Institut, a bien voulu s'intéresser à mes recherches et a accepté de présenter quelques notes préliminaires; je lui en suis très reconnaissante, ainsi que d'avoir accepté de publier ce travail dans les *Annales de l'Institut Océanographique*.

Au Laboratoire de Minéralogie de la Sorbonne, où j'ai toujours rencontré le meilleur accueil, je voudrais remercier spécialement M. B. SALAGNAC qui, avec toute la compétence nécessaire, a fait mes diagrammes de rayons X et m'a aidée à les dépouiller.

Je suis aussi heureuse de pouvoir remercier ici M. JACQUES FAUCHERRE, chef de travaux pratiques de Chimie, dont les conseils amicaux m'ont toujours été très précieux.

Dans l'équipe actuelle de M. BOURCART, je dois tout particulièrement remercier M. W. NESTEROFF, attaché de recherches au C. N. R. S. qui, travaillant sur les formations calcaires dans les mers tropicales, a bien voulu me communiquer ses résultats et travailler en collaboration avec moi. Que tous les autres membres de cette équipe, qui, s'ils n'ont pas participé directement à ce travail, m'ont sans cesse aidée par leur esprit de camaraderie, acceptent également le témoignage de mon amitié — une place particulière devant être réservée à M^{lle} G. ENARD, cartographe, qui m'a prêté une aide amicale dans l'illustration de ce travail.

II. — ÉTUDE DES SÉDIMENTS

a. — Méthodes analytiques.

1° DOSAGES DES SULFURES. — Les dosages concernant les sulfures sont nécessairement faits sur des échantillons humides, et le plus rapidement possible après la récolte des échantillons. En effet, comme le montreront des expériences décrites plus loin, les sulfures sont en constante évolution et varient de façon appréciable lorsqu'on conserve les échantillons en bocal. D'autre part, si l'on dessèche l'échantillon à l'étuve, les sulfures s'oxydent en sulfates et les seules formes de sulfures qui résistent sont les sulfures stables comme la pyrite. Par conséquent, malgré le manque de précision apparente de cette méthode, je travaillerai sur des échantillons humides, le plus rapidement possible après leur récolte, et en faisant parallèlement des teneurs en eau, afin de donner toujours le résultat par rapport au poids sec.

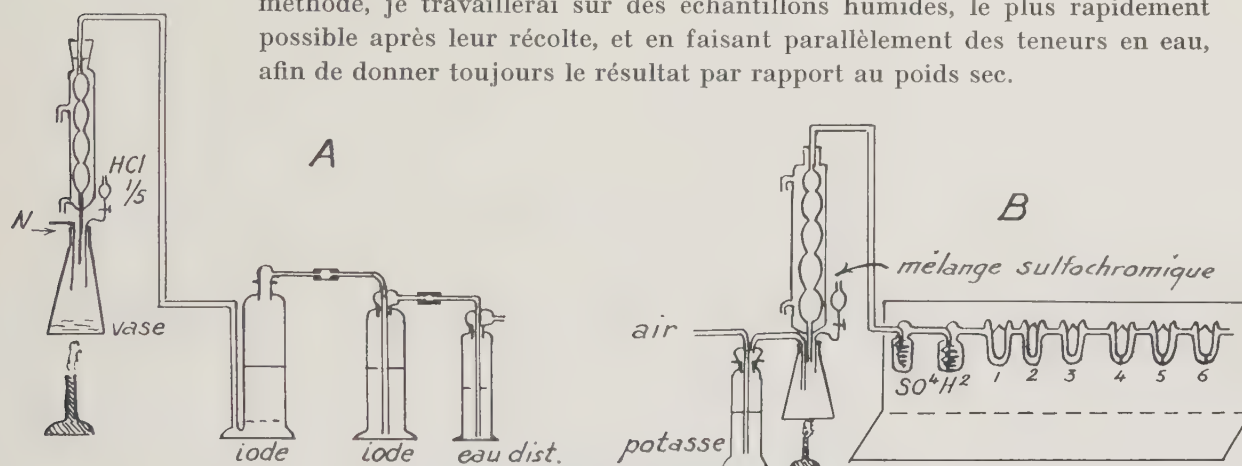


FIG. 2. — A, Appareil à sulfures. — B, Appareil de Fressenius-Classsen
(1, ponce + SO_4Cu ; 2, potasse; 3, potasse; 4, ponce + SO_4H_2 , potasse; 5, id; 6, potasse, ponce + SO_4H_2).

La mise au point du dosage des sulfures a présenté quelques difficultés en raison de certaines expériences de laboratoire que je voulais faire en enrichissant des sédiments avec du soufre ou divers composés du soufre. Je n'ai pu avoir recours à certaines méthodes classiques d'analyse, telle l'oxydation du soufre total en sulfates par un oxydant puissant (eau régale) et dosage à part des sulfates.

J'ai attaqué les sulfures par un acide afin d'obtenir un dégagement d' H_2S . Dans une première série d'expériences, j'ai fait barbotter l' H_2S dégagé par l'attaque à SO_4H_2 , et entraîné par un courant d'azote, dans une solution d'acétate de zinc, dans laquelle on ajoute ensuite de l'iode en excès que l'on titre en retour avec de l'hyposulfite. Ce dosage donnant de très bons résultats avec des sulfures purs ne peut convenir à des dosages dans la vase; en effet, le SO_4H_2 arrivant sur la vase donne, d'une part, un dégagement d' H_2S , mais aussi, en attaquant les matières organiques, un dégagement de SO_2 qui réduit l'iode que l'on introduit dans l'acétate de zinc. Pour éviter de tels ennuis et pour simplifier la pratique du dosage, j'ai mis au point la méthode suivante :

La fiole conique, ou erlenmeyer, qui a servi à récolter l'échantillon, une fois pesée pour obtenir le poids d'échantillon humide, sert directement de flacon d'attaque; pour ce faire, elle est bouchée par un bouchon à trois trous (voir schéma de l'appareil, fig. 2). Par un orifice arrive un courant d'azote, le deuxième est muni d'une ampoule à brome qui permet d'introduire de l'acide chlorhydrique au 1/5; le troisième est muni d'un réfrigérant vertical pour permettre l'attaque à chaud nécessaire pour la décomposition des sulfures, mais concentrant les vapeurs de chlore afin d'éviter qu'elles aillent barbotter avec l' H_2S . Puis font suite trois barboteurs, le premier contenant, suivant la richesse présumée en sulfures, 4 ou 8 cm^3 d'iode N/10 dilués à 150 cm^3 environ, le deuxième 1 ou 2 cm^3 d'iode N/10 dilués à 50 cm^3 environ, le troisième contient de l'eau distillée et est destiné à recueillir les vapeurs d'iode qui finissent par se dégager, étant données, d'une part, la longueur de l'attaque (environ une heure et demie), et, d'autre part, la difficulté d'empêcher complètement l'échauffement de la solution d'iode. Des expériences à blanc, sans sulfures, ont montré que ce flacon de garde était nécessaire et suffisant, et des expériences avec des quantités variables de sulfures ont montré que la précision de cette méthode était largement suffisante pour le but que je poursuivais. Au cours de ces expériences, j'ai été amenée à remplacer le premier barboteur ordinaire par un barboteur avec diffuseur en verre frité, de façon à améliorer le contact entre l' H_2S et l'iode.

2° DOSAGE DU CARBONE ORGANIQUE. — L'appareil de Fressenius Classen a été adopté (voir schéma, fig. 2). Il ne nécessite pas d'appareillage compliqué et, par conséquent, peut être monté dans n'importe quel endroit.

3° DOSAGE DES CARBONATES. — On a utilisé la méthode courante de dégagement de CO_2 dans l'appareil de Schroeter.

b. — Répartition des sulfures dans les sédiments de la baie de Villefranche.

Des dosages ont été effectués sur des échantillons ramassés au sondeur Léger, d'une part, dans la vase noire qui constitue la tache sans herbier du fond de la baie et qui se trouve à des profondeurs de —16 à —18 m, et, d'autre part, dans la vase que l'on trouve dans les fonds supérieurs à 45 m, qui est semblable à la vase qui tapisse le plateau continental et les vallées sous-marines de cette région; sa couleur varie du gris bleu au beige (voir carte de répartition des échantillons, fig. 3).

Comme le montre la carte de la figure 4, dans la vase noire, on ne rencontre que très rarement des teneurs en sulfures inférieures à 100 mg (valeurs exprimées en S) pour 100 g de vase sèche; cette valeur peut, au centre de la tache, atteindre 279 mg S. Les valeurs inférieures à 100 n'ont été observées que sur les bords de la tache, contre l'herbier; en ces endroits, la vase est moins caractéristiquement noire; elle est parfois mélangée de sable.

Dans les profondeurs supérieures à 45 m, l'aspect de la vase est tout autre: si l'on trouve encore, en tête de la dépression, des vases dont l'aspect extérieur se rapproche des vases de la cuvette, on passe très rapidement à des vases s'apparentant aux vases du large; elles ne dégagent aucune odeur, et leur pourcentage en S dépasse rarement 100, la teneur moyenne se situant aux environs de 60 mg de S pour 100 g de vase sèche.

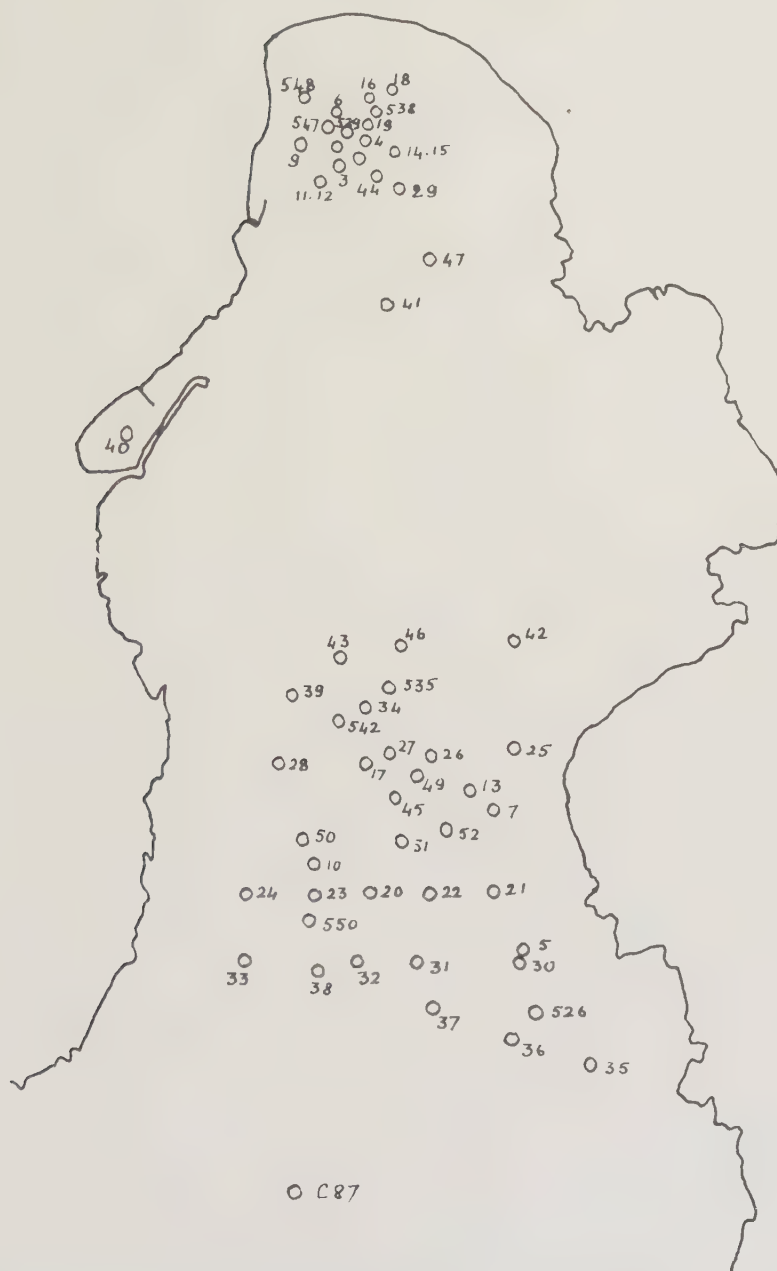


FIG. 3. — Baie de Villefranche. Position des échantillons.

Il y a donc certainement là une opposition de régime d'aération entre ces deux régions. La cuvette du fond de la baie, séparée du reste par un seuil à environ 15 m, est très peu aérée; les échanges avec le reste de la baie ne pouvant pas se faire, elle constitue par excellence un milieu réducteur, alors que dans les fonds supérieurs à 45 m on se trouve dans un chenal à pente très rapide, directement en communication avec le large où les courants peuvent pénétrer et entretenir ainsi un milieu plus oxydant.

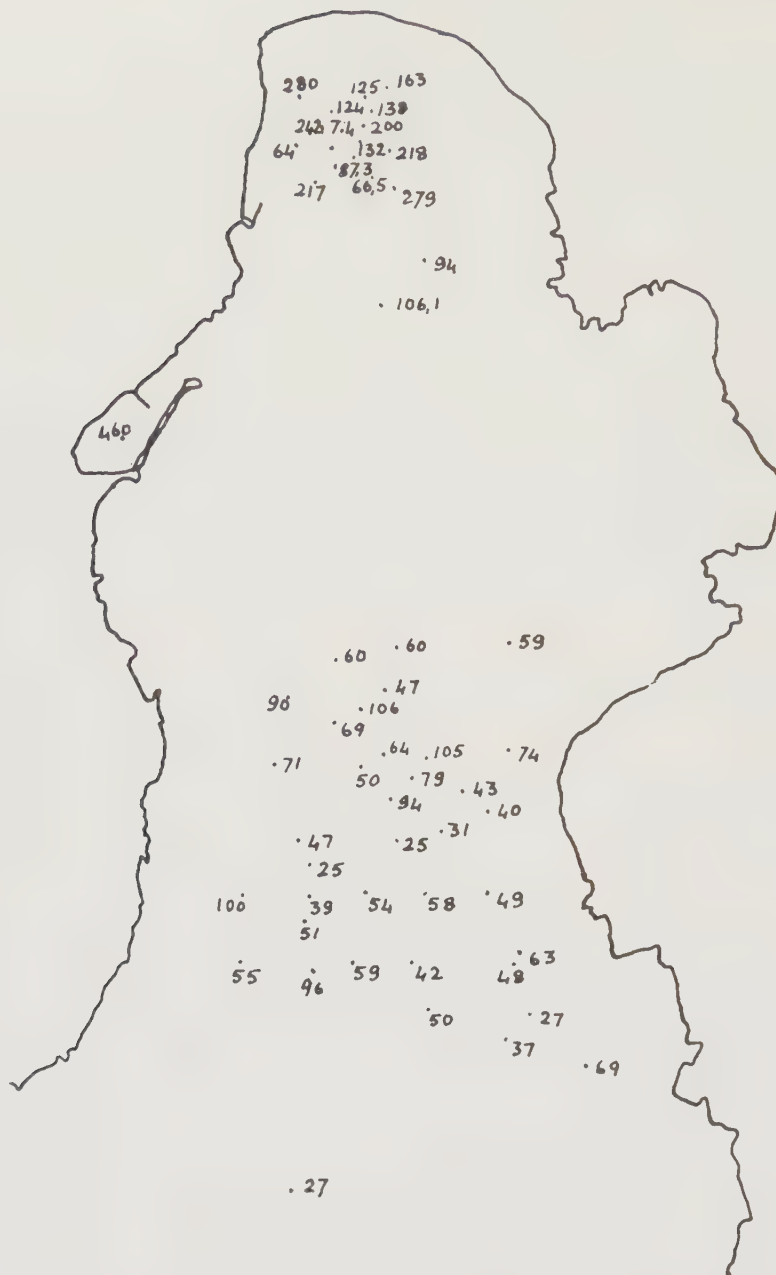


FIG. 4. — Baie de Villefranche.
Répartition des sulfures en mg de S pour 100 g de vase sèche (1953).

c. — Répartition des carbonates.

Les carbonates ont été dosés sur la plupart des échantillons dont les sulfures avaient été dosés. Ce dosage est effectué sur la portion de sédiment qui passe au tamis 350 (mailles de 0,04 mm) pour éviter les grosses fractions de calcaire — tels les fragments de coquilles — qui fausseraient les résultats.

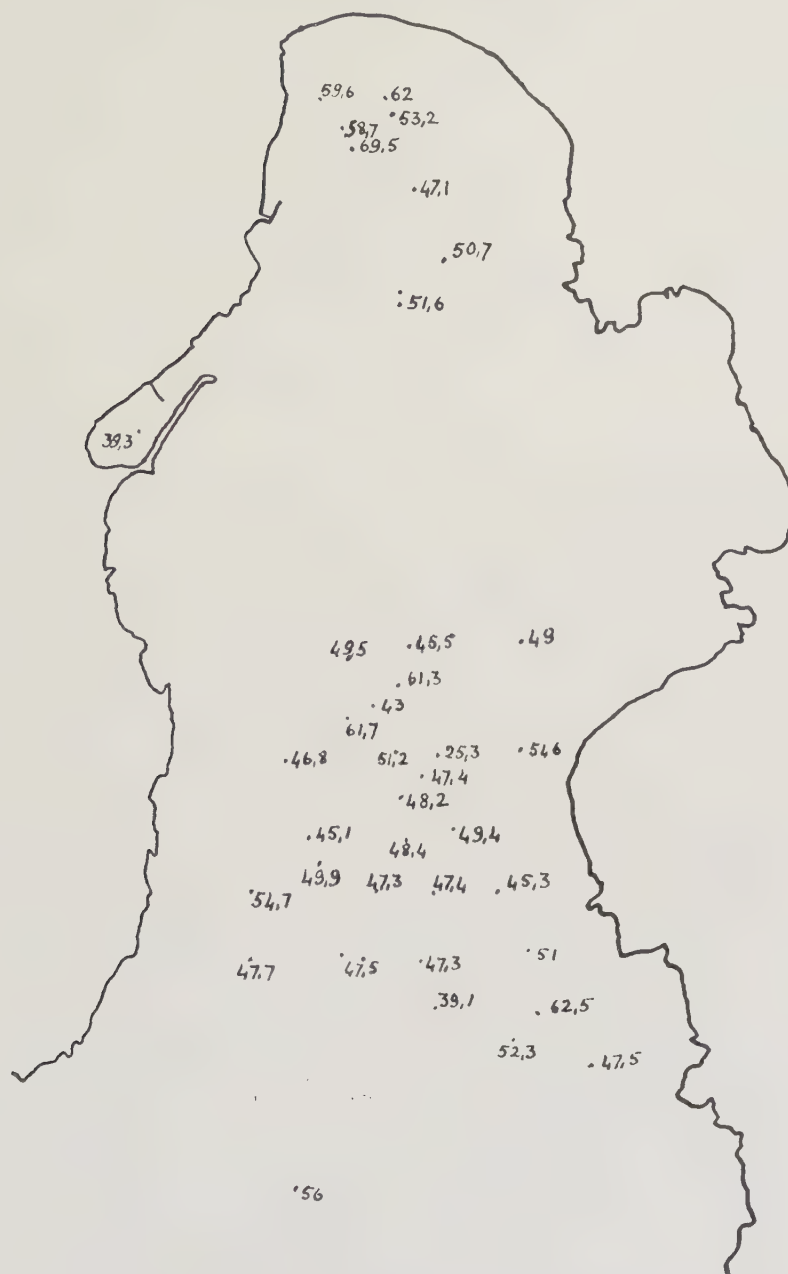


FIG. 5. — Baie de Villefranche.
Répartition des carbonates calculés en CaCO₃ pour 100 g de vase sèche (1953).

D'après la carte ci-dessus (fig. 5), on voit que cette teneur en calcaire est très peu variable d'un échantillon à l'autre, et se trouve toujours aux environs de 50 % ; il n'existe en tout cas pas de différence essentielle entre les échantillons de vase noire et ceux de vase profonde.

Dans sa publication sur la baie de Villefranche, citée plus haut, J. BOURCART a montré que cette teneur en calcaire est très variable en un même point, d'une année sur l'autre,



FIG. 6. — Baie de Villefranche. Répartition du carbone organique en gramme de C pour 100 g de vase sèche (1953).

pouvant même varier du simple au double, c'est pourquoi je ne donnerai ici que les résultats obtenus pour des échantillons sur lesquels les dosages de sulfures ont été faits en même temps, et tous récoltés la même année, en 1953. Il ne semble, par conséquent, pas exister de relation directe entre la richesse d'un échantillon en sulfure et sa richesse en carbonates.

d. — Répartition du carbone organique.

Un certain nombre de dosages de carbone organique, par voie humide de Fressenius Classen, ont été effectués sur les mêmes échantillons de vase. Ces dosages ont aussi, comme les dosages de carbonates, été faits, sur la partie inférieure au tamis 350, pour éliminer les fragments animaux ou végétaux trop importants.

La carte de la répartition du carbone organique est donnée figure 6. On peut remarquer que les vases de la tache noire, ainsi que celles de la tête du chenal, sont nettement plus riches en carbone organique que celles vers le large. Ce phénomène étant probablement dû à la possibilité d'une plus grande sédimentation des organismes morts dans ces régions de turbulence moins grande.

III. — VARIATION AU COURS DE LA CONSERVATION

Au cours de mes recherches sur la répartition des sulfures dans les sédiments de la baie de Villefranche, j'ai été amenée à déterminer dans quelle mesure on pouvait doser les sulfures sur un échantillon ayant séjourné quelque temps dans le laboratoire, et, de là, à chercher quelles étaient les meilleures conditions de conservation afin de pouvoir recueillir plusieurs échantillons à chaque sortie en mer.

Selon les méthodes standards américaines pour l'examen des eaux, il est nécessaire, lorsque l'eau est riche en H_2S , de fixer celui-ci par une solution d'acétate de zinc, afin d'éviter le départ de l' H_2S en solution. C'est pourquoi j'ai fait plusieurs séries de dosages dont les courbes moyennes sont données dans le tableau suivant (fig. 7). Partant du même échantillon, une partie était simplement conservée dans le bocal, à la lumière du laboratoire, une autre partie était conservée dans l'obscurité, une autre partie à la lumière, mais sous eau de mer, et la quatrième partie, fragmentée dans les erlenmeyers d'attaque, était, après pesée, additionnée d'une solution à 20 % d'acétate de Zn.

Comme le montre le graphique, aucune de ces méthodes ne s'est montrée satisfaisante, la meilleure manière d'opérer étant sans conteste le dosage immédiat.

Cependant, ces expériences, si elles ont eu un résultat négatif en ce qui concerne la conservation des échantillons, n'ont pas été inutiles, car elles m'ont amenée à envisager un autre côté du problème qui formera la deuxième partie de ce travail.

Au cours des expériences sur la conservation sous acétate de zinc, j'ai pu constater qu'il semblait y avoir une augmentation de la teneur en carbonates du sédiment. En effet, au fur et à mesure des prises d'essai pour les dosages de sulfure, l'attaque à l'acide chlorhydrique nécessaire au dosage des sulfures me donnait une effervescence de plus en plus marquée, au point qu'elle arrivait à gêner le dosage en entraînant trop rapidement l'hydrogène sulfuré et que même, parfois, elle faisait déborder l'erlenmeyer d'attaque.

Ces résultats préliminaires m'ont amenée à faire un rapprochement avec les phénomènes de précipitation du carbonate de calcium dans l'eau de mer en présence de grandes quantités de matière organique — phénomènes provoquant un fort dégagement d'hydrogène sulfuré; un certain nombre d'auteurs, dont NADSON (1928) et LEGENDRE (1938), liant la précipitation du carbonate de calcium au cycle du soufre, il m'a semblé intéressant de poursuivre ces études. C'est pourquoi j'ai entrepris toute une série d'expériences de labo-

ratoire sur l'évolution des vases en fonction des différents facteurs, cette évolution étant, bien entendu, considérée comme bactérienne. Etant donné que les phénomènes se passant dans la nature sont très complexes et faits d'interactions, il ne m'a pas semblé utile d'essayer d'isoler les espèces bactériennes responsables de ces phénomènes. Par la méthode des « cultures aquarium » préconisée par S. Winogradski, j'ai considéré l'eau de mer et la vase comme une unité de milieu. La partie purement bactériologique pouvant faire l'objet d'un travail ultérieur.

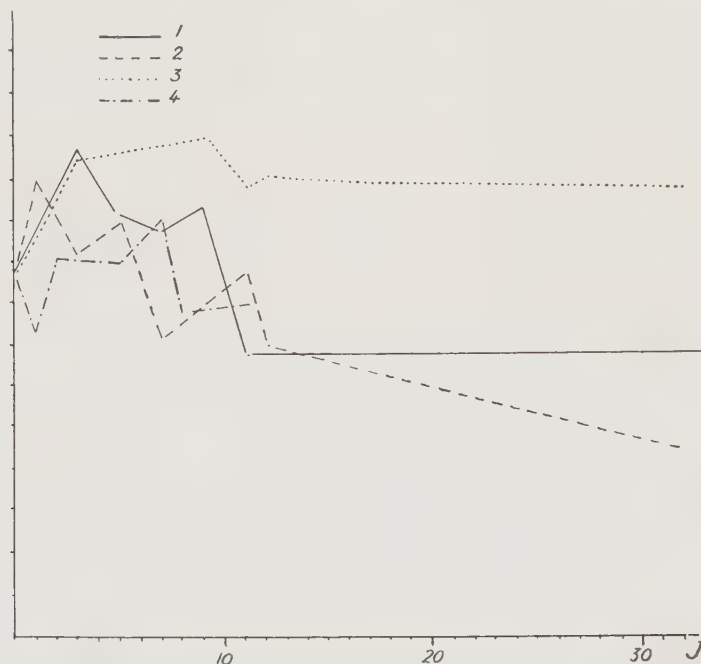


FIG. 7. — Variation de la teneur en sulfure d'un échantillon de vase au cours de sa conservation et en fonction du mode de conservation.

En abscisse : jours de conservation; en ordonnée : S en mg pour 100 g de vase sèche. 1, obscurité; 2, lumière du jour; 3, sous eau de mer; 4, sous acétate de zinc.

DEUXIÈME PARTIE

I. — HISTORIQUE

Dans son traité sur la Microbiologie marine, ZOBELL (1946) résume, dans un chapitre consacré à la précipitation du carbonate de calcium dans l'eau de mer, les différentes théories émises jusqu'alors.

Il semble que ce soient MURRAY et IRVINE (1899) qui, les premiers, aient songé à rattacher la précipitation du carbonate de calcium à la vie bactérienne. Pour eux, la précipitation du carbonate de calcium provient de la réaction du carbonate d'ammonium sur le sulfate de calcium suivant l'équation :



Le carbonate d'ammonium, provenant de l'ammoniaque et du CO_2 , résultant de la désintégration microbienne des substances organiques azotées.

NADSON (1903) montre que la production bactérienne d'ammoniaque à partir des matières organiques en décomposition provoque la précipitation de carbonate de calcium dans le lac Weissovo.

Le premier facteur qui a été impliqué dans cette précipitation est le pH; d'après MOBERG, GREENBERG, REVELLE et ALLEN (1934), la production d'ammoniaque tend à accroître le pH de l'eau de mer et à occasionner ainsi la précipitation du carbonate de calcium; NADSON signale que certains organismes réduisent les nitrates en azote libre ou en ammoniaque, élevant ainsi suffisamment le pH pour obtenir la précipitation du carbonate de calcium.

DREW (1911-1912-1913) attribue la précipitation du carbonate de calcium dans la mer à l'action des bactéries dénitrifiantes :



il considère que le processus est pratiquement spécifique et nomme ces bactéries *Bacterium calcis*. Ce même organisme est décrit plus en détail par KELLERMAN et SMITH (1914), sous le nom de *Pseudomonas Calcis*. Cette bactérie est très voisine des bactéries dénitrifiantes marines décrites par GRAN (1901), BAUR (1902), FEITEL (1903) et PARLAND (1911).

KELLERMAN et SMITH (1914) donnent comme réaction :



BERKERLEY (1919) attribue la précipitation du carbonate de calcium dans l'eau, en premier lieu à l'oxydation bactérienne des sels organiques de calcium :



LIPMAN (1924) met en doute l'existence d'une bactérie spécifique de la précipitation du carbonate de calcium; il montre sur un grand nombre d'espèces bactériennes, isolées de l'eau de mer à Samoa, et parmi lesquelles se trouve probablement *Pseudomonas calcis*, qu'elles précipitent toutes le carbonate de calcium, mais seulement quand on ajoute à l'eau de mer d'importantes quantités de sels de calcium. Ses conclusions l'amènent à envisager deux hypothèses :

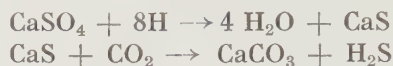
1° Soit précipitation aux abords de la matière vivante en décomposition : la libération de $(\text{NH}_4)_2 \text{CO}_3$ donne une précipitation de CaCO_3 à partir de CaSO_4 .

2° Soit, en l'absence de matière organique en décomposition, précipitation par simple changement de la pression de CO_2 .

SMITH (1926) étudie les bactéries des boues calcaires du banc des Bahamas. Seules les dénitrifiantes et les ammonifiantes fortes forment de la calcite à partir du sulfate de calcium dans l'eau de mer.

BAVENDAMM (1931-1932) fait une revue de la littérature à ce sujet et donne le résultat de ses recherches. Il conclut que la précipitation du carbonate de calcium dans les mers tempérées est, au début, un phénomène microbiologique, mais qu'il n'y a pas de bactéries spécifiques du calcium. La précipitation microbiologique du carbonate de calcium est en grande partie limitée à des zones où il y a une forte teneur en matière organique. Cette condition n'est pas remplie pour la plupart des fonds marins, mais on la trouve certainement dans les eaux peu profondes. Il pense que le phénomène de la précipitation du

calcaire dans les mers tropicales est dû à des bactéries qui réduisent les sulfates. Leur activité pourrait se produire d'après les formules suivantes :



formules qui expliqueraient la présence d'hydrogène sulfuré dans les couches crayeuses. Comme, d'autre part, dans les mers tropicales, la température est plus élevée, la chaux, sous forme de carbonates, est moins soluble que dans les eaux froides, ce qui facilite sa précipitation.

BRUSSOF (1933), travaillant sur des souches venant des sources thermales d'Aix-la-Chapelle, considère qu'il existe des bactéries spécifiques, au point qu'on les retrouve dans les formes cristallines; son travail concernant plutôt les formes cristallines, nous en reparlerons dans un chapitre ultérieur.

LEGENDRE (1938) a signalé que dans les boursouffures que l'on remarque sur les tôles métalliques immergées dans l'eau de mer se trouvaient des dépôts de carbonates de calcium associés à une flore bactérienne très riche et à une forte odeur nauséabonde d'hydrogène sulfuré. NADSON (1928) avait aussi lié cette précipitation du carbonate de calcium au cycle du soufre, par suite du fort dégagement d'hydrogène sulfuré que l'on trouve toujours dans les boues calcaires.

On se trouve par conséquent en présence d'un certain nombre de théories, bactériennes ou non, sur la précipitation du carbonate de calcium.

BAIER (1937) fait la liste des différentes façons dont les microorganismes peuvent influencer l'équilibre du CaCO_3 , il indique quatre manières : 1° par leur effet sur le pH; 2° en produisant ou en consommant du CO_2 ; 3° en oxydant les sels organiques de calcium; 4° en assimilant le calcium.

Je n'ai, bien entendu, pas l'ambition d'avoir cité ici tous les auteurs qui ont travaillé sur cette question, mais je pense avoir résumé les principales théories. On pourra trouver en fin de ce travail une bibliographie plus complète.

II. — PRÉCIPITATION EXPÉRIMENTALE DES CARBONATES EN CULTURES AQUARIUM

1. — Généralités.

a) EVOLUTION « MACROSCOPIQUE » DES VASES CONSERVÉES. — Lorsque, dans un aquarium, en eau courante ou en eau stagnante, on met une assez grande quantité de vase noire du fond de la baie de Villefranche, de façon à ce que la couche fasse environ 5 à 6 cm, et qu'on la recouvre d'eau de mer (sur environ 20 cm) on constate, au bout de deux ou trois jours, que la surface de cette vase noire devient beige, mettant en évidence des phénomènes d'oxydation. Cette pellicule superficielle ne dépasse pas 2 ou 3 mm; le fond de la vase devient gris fer et est parsemé de petites taches noires. L'eau de mer surnageante reste limpide pendant toute la durée de l'expérience, soit environ deux mois. Il se forme au bout d'une semaine un léger voile irisé et organique en surface, constitué essentiellement d'algues microscopiques, de protozoaires, de diatomées et, parfois, de très petits frag-

ments minéraux, quartz ou micas, restés en suspension, ou remontés par les bulles gazeuses.

Si, dans les mêmes conditions, on conserve un aquarium contenant de la vase noire et de l'eau de mer glucosée à 0,5 g %, la vase conservera sa teinte noire; au bout de trois jours, on obtient un léger voile irisé semblable à celui obtenu dans l'aquarium précédent; au bout de quatre jours, le liquide se trouble, et la culture dégage une forte odeur de fermentation, accompagnée d'un dégagement plus ou moins intense de bulles gazeuses; dès que ce dégagement a cessé, au bout du huitième jour de culture environ, le voile est beaucoup plus important et ocre; si on le retire à ce moment, on voit qu'il fait une assez forte effervescence à l'acide chlorhydrique et qu'il a une très forte réaction au sulfocyanure de potassium; il est donc essentiellement formé de carbonates et de fer, avec un léger support organique. Très rapidement ensuite, le liquide surnageant devient noir; cette coloration est due à de très petites particules noires en suspension dans ce liquide; ces particules sont solubles très facilement dans l'acide chlorhydrique avec dégagement d'hydrogène sulfuré (on doit donc les considérer comme un monosulfure de fer); elles se déposent sur les parois de l'aquarium, rendant celles-ci complètement opaques; une forte odeur d'hydrogène sulfuré se dégage de l'aquarium, et un voile blanc cristallin et consistant se forme; celui-ci est totalement soluble avec effervescence dans l'acide chlorhydrique; pour un aquarium contenant 2,5 l. d'eau de mer, si l'on retire le voile chaque fois qu'il est bien formé, on observe cette formation pendant un mois; le dégagement d'hydrogène sulfuré cesse quelques jours avant la fin de la formation du voile.

Si, lorsque le voile ne se forme plus, on laisse l'aquarium quelque temps exposé au soleil, on voit apparaître dans la vase d'abord, puis envahissant tout le liquide ensuite, une teinte rose caractéristique des bactéries pourpres. Ces bactéries pourpres, que l'on rencontre uniquement dans les cultures faites en été et laissées au soleil, présentent des formes de sarcines comme celles qui ont été signalées en colonies sur les sables et les vases de l'Aber de Roscoff et la slikke de la rivière de Penzé et que l'on ne trouve qu'en été. Elles font partie des Thiorodhobactéries qui oxydent l'hydrogène sulfuré ou le soufre en SO_4 .

b) HYPOTHÈSE SUR LE MÉCANISME DE LA PRÉCIPITATION DES CARBONATES. — Le glucose intervient ici comme accélérateur de la réaction, car il sert à nourrir les bactéries. Il remplace la matière organique en décomposition dans les fonds marins, et a l'avantage d'être plus rapidement assimilable et, par conséquent, de donner lieu à un développement plus rapide des bactéries.

Les phénomènes qui se déroulent pendant les huit premiers jours correspondent à cette assimilation du carbone et donnent lieu à un important dégagement de gaz carbonique. La formation d'un voile ferrugineux met en évidence une migration du fer. Parmi les bactéries qui se développent rapidement, les bactéries sulfato-réductrices entrent alors en action, réduisant les sulfates de l'eau de mer, et donnant le dégagement d'hydrogène sulfuré qui fait suite au dégagement de gaz carbonique. Une partie de cet hydrogène sulfuré réagit sur l'hydroxyde de fer en suspension, ce qui donne ces fines particules noires qui seraient alors du monosulfure de fer très instable. Parallèlement, les ions calcium et magnésium du milieu, au contact du CO_2 dissous, donneraient des carbonates de calcium, de magnésium, ou des carbonates doubles.

Pour vérifier cette hypothèse sur la formation des carbonates, j'ai, sur plusieurs cul-

tures aquarium, procédé aux analyses suivantes : 1° Mesures de pH, qui doivent mettre en évidence la libération de CO_2 et de H_2S . 2° Mesures de l' H_2S dissous. 3° Dosages des sulfates en solution dans l'eau de mer. 4° « Productivité » en grammes de carbonates.

c) MÉTHODES ANALYTIQUES. — 1° *Mesure du pH*. — Les mesures de pH ont été effectuées avec l'appareil de Carpeni-Constant; elles ont toujours été effectuées directement dans le milieu par l'intermédiaire du bloc support électrodes avec une électrode de verre blindée.

2° *Mesures de l' H_2S dissous*. — Ces mesures ont été effectuées selon la méthode de dosage de l' H_2S dissous dans les eaux. Une quantité déterminée de liquide est ajoutée à une solution d'iode de titre connu et légèrement acidulée; le tout, dans un flacon bouché à l'émeri, est secoué violemment, puis titré à l'hyposulfite. Les résultats sont donnés en milligrammes de soufre pour 100 cm^3 d'eau de mer. Les courbes donnant les résultats de ces dosages ne sont qu'indicatives; en effet, une partie de l' H_2S se dégage dans l'air, et les cultures devant se développer, comme nous le verrons plus loin, à l'air libre, il ne m'a pas été possible de récupérer l' H_2S qui se dégage.

3° *Dosage des sulfates en solution dans l'eau de mer*. — Les dosages de sulfates ont été faits suivant la méthode gravimétrique courante, par précipitation du sulfate de baryum en milieu acide. Pour les cultures faites à Paris, le précipité a été grillé au four à 600°; pour les cultures faites à Villefranche où il n'existe pas de four à calciner, les précipités ont été simplement desséchés à poids constant à l'étuve; ceci n'a d'ailleurs pas une grande importance, les résultats devant être comparatifs dans un même aquarium, la nécessité d'obtenir des valeurs absolues ne s'impose pas.

4° *Productivité en carbonates*. — Par « productivité » en carbonates, j'entends la quantité totale de carbonates recueillie au cours d'une expérience, par pesée des voiles successifs. Ces résultats sont approximatifs en ce sens que, d'une part, ils sont inexacts par défaut, car une partie des carbonates se forme sur les parois du bocal en une croûte dure irrécupérable et, d'autre part, par excès, car le précipité est très difficile à bien laver, et il n'est pas rare, au cours de l'examen des voiles au microscope, de trouver quelques cristaux de gypse ou de chlorure de sodium recristallisés au cours du dessèchement du voile à l'étuve.

REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DE LA PRODUCTIVITÉ. — Comme on le verra plus loin, si l'on tient compte des raisons d'imprécision données au paragraphe précédent, dans des conditions analogues, la productivité en carbonates est, en gros, proportionnelle à la quantité d'eau de mer fournie. C'est pourquoi je donnerai, lorsque ce sera nécessaire pour la comparaison entre deux cultures, d'une part une courbe cumulative réelle du phénomène, et, d'autre part, la même courbe recalculée en considérant le résultat final comme étant égal à 100 %. Ces dernières courbes ont été établies pour permettre le rapprochement de cultures ayant été faites avec des quantités d'eau de mer différentes; en effet, il ne m'a pas toujours été possible d'utiliser des aquariums contenant 2 ou 3 l. d'eau de mer. Pour compléter cette étude, j'ai essayé de voir s'il était intéressant d'utiliser une échelle de probabilité. Comme on peut le voir sur les figures suivantes, ces courbes sont beaucoup moins parlantes que les courbes cumulatives en %.

La figure 8 donne les trois sortes de courbes pour un des aquariums mis en culture; la figure 9 montre l'intérêt de réduire les résultats en courbe décimale %. En effet, sur

cette figure sont représentées les courbes réelles et les courbes décimales en %, d'une part, pour un aquarium contenant 3 l. d'eau de mer, et, d'autre part, pour un erlenmeyer ne contenant que 150 cm³ d'eau de mer; les courbes réelles, comme on le voit, ne sont pas comparables, alors que les autres le sont facilement.

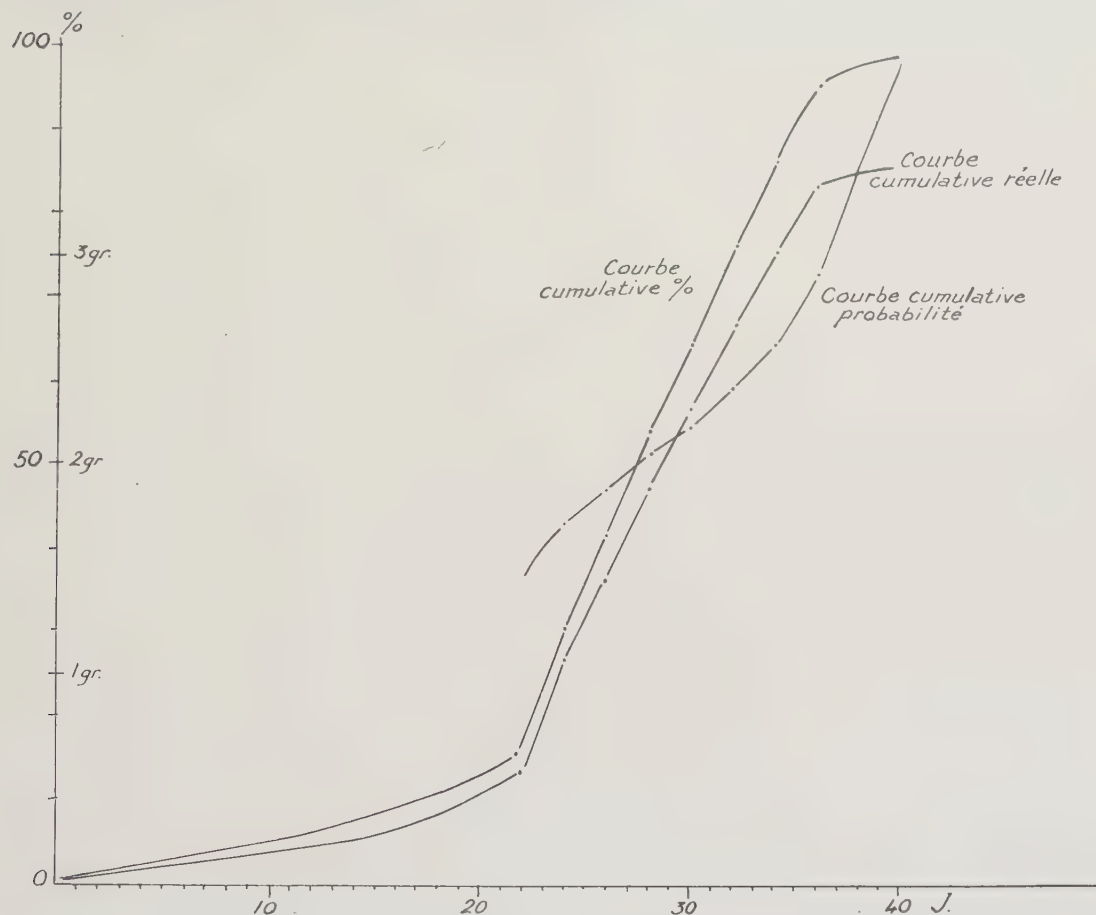


Fig. 8. — Diverses représentations graphiques de la « productivité » en carbonates pour une même culture.

d) EVOLUTION CHIMIQUE DANS L'EAU DE MER AU-DESSUS DE LA VASE AU COURS DE LA PRÉCIPITATION DES CARBONATES. — Soit quatre aquariums contenant tous les quatre à peu près la même quantité de vase noire de Villefranche, environ 2 kg, recouverte de 3 l. d'eau de mer :

L'aquarium I est laissé tel quel. L'aquarium II est additionné de 0,5 g % de glucose dans l'eau. L'aquarium IV, identique au II, est recouvert d'une couche d'huile de vaseline de 3 cm d'épaisseur. L'aquarium X, identique au II, est muni d'un diffuseur d'air comprimé.

J'ai dosé régulièrement dans ces quatre aquariums les sulfates dans l'eau de mer, l'hydrogène sulfuré dissous et, lorsque cela était possible, la quantité de carbonates formée.

Résultats obtenus dans l'aquarium I. — Au cours d'un mois et demi de culture, on obtient toujours une quantité constante de sulfates, soit 3 g (exprimés en SO₄) par litre d'eau, je n'ai jamais pu déceler la présence d'hydrogène sulfuré; il n'y a pas formation

de voile de carbonates; les données chimiques concordent donc avec les données « macroscopiques » : il n'y a pas de changement important dans la constitution de l'eau. Il avait, d'autre part, été fait antérieurement, dans un autre aquarium identique, des dosages d'oxygène dissous qui avaient mis en évidence, au cours d'un mois de culture, une très légère hausse de la quantité d'oxygène dissous. Le milieu serait donc légèrement oxydant

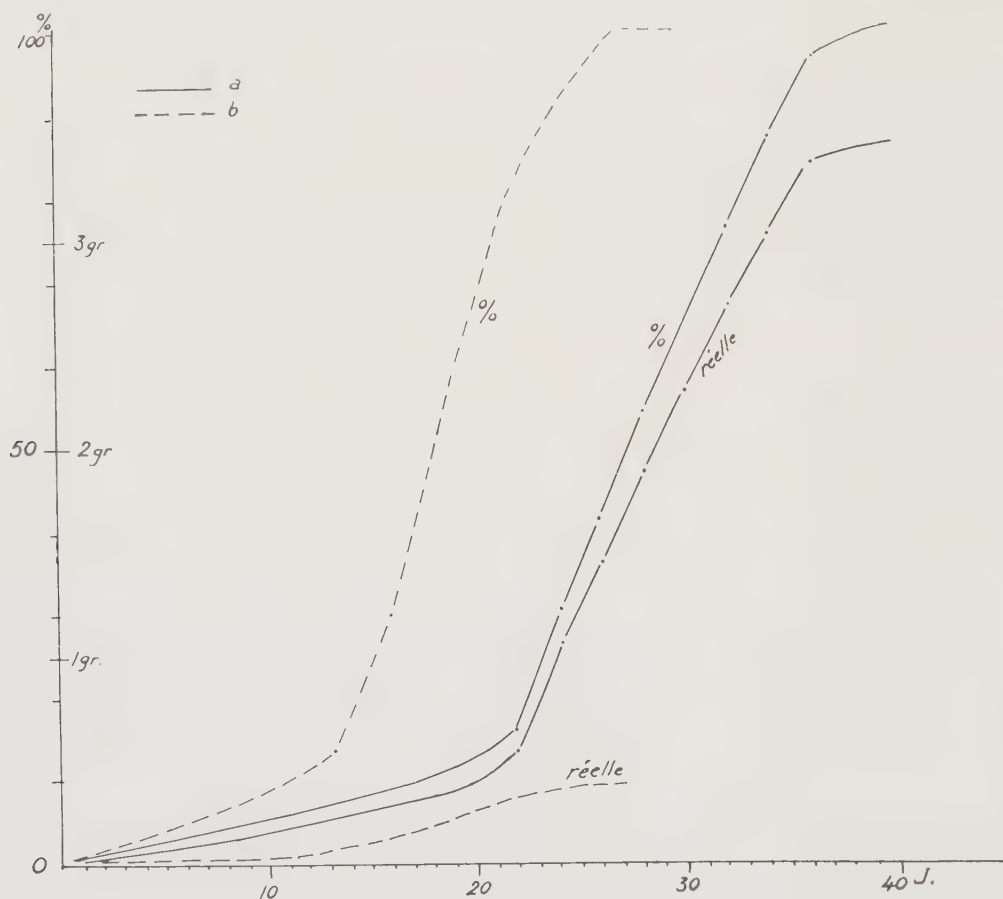


FIG. 9. — Courbes cumulatives réelles et en % pour deux cultures contenant des quantités d'eau de mer très différentes. *a*, aquarium 1,3 litres; *b*, Erlenmeyer 26, 150 cm³.

Résultats obtenus dans l'aquarium II. — Si l'on obtient des valeurs constantes dans le cas précédent, il n'en est pas de même pour l'eau de l'aquarium II.

Pendant la première décade de culture, la quantité de sulfates dans l'eau reste à peu près constante, avec une très légère tendance à la diminution; de 3 g le premier jour, elle passe à 2,8 g, puis elle diminue plus rapidement jusqu'au vingt-troisième jour où elle n'est plus que de 2 g; ensuite, elle diminue régulièrement et rapidement, pour être pratiquement nulle au bout de quarante jours.

L'hydrogène sulfuré commence à se dégager de façon importante au bout du huitième jour; le maximum est atteint au bout de 27 jours. A partir de ce moment là, on obtient une décroissance régulière de sa valeur. Tout se passe comme si les sulfates

étaient réduits en H_2S , très rapidement au début, de façon à amener une sursaturation de l'eau de mer en H_2S ; puis, la quantité de sulfates diminuant, la quantité d' H_2S dégagée devient inférieure à la quantité qui se répand dans l'atmosphère; d'où cette diminution de l' H_2S dissous avant l'épuisement des sulfates. Comme le montrent les courbes suivantes (fig. 10), le voile de carbonates commence à se former de façon importante au bout du treizième jour, soit légèrement plus tard que le début de la diminution des sulfates.

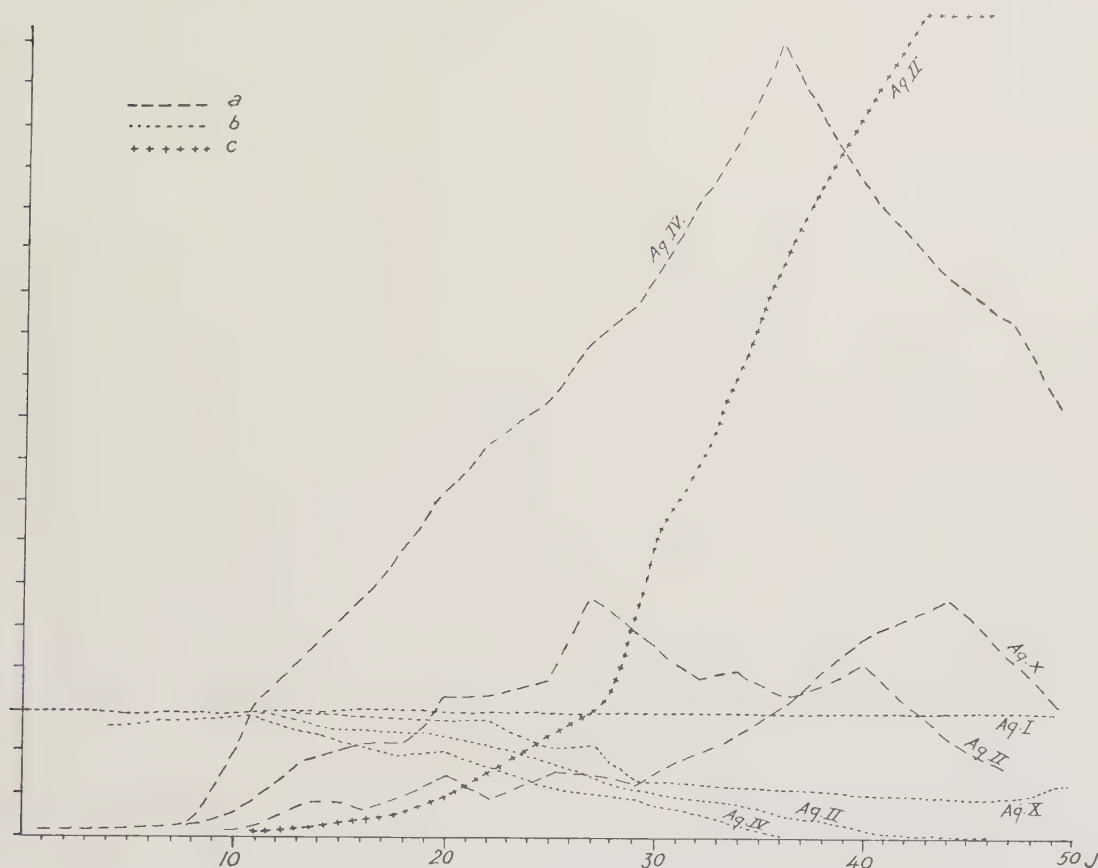


FIG. 10. — Variations de l'hydrogène sulfuré dissous, des sulfates dans l'eau et de la productivité en carbonates dans les aquariums : I, sans addition de glucose; II, + 0,5 % glucose; IV, *id.* à II + huile de vaseline; X, *id.* à II + air comprimé.
1 division en ordonnées = 0,02 g S‰ (a); = 1 g SO_4 ‰ (b); = 5 % carbonates (c).

Il prend une très grande ampleur jusqu'au trentième jour; cette période est suivie d'une diminution quantitative de ce voile qui cesse de se former après épuisement des sulfates.

Résultats obtenus dans l'aquarium IV. — L'aquarium IV est recouvert d'une couche d'huile de vaseline, ce qui a pour résultat d'empêcher la diffusion du CO_2 et de l' H_2S dans l'atmosphère. On obtient, pour l' H_2S dissous, une courbe qui débute, comme précédemment, très rapidement vers le huitième jour, mais qui, ensuite, croît beaucoup plus rapidement pour atteindre, le trente-sixième jour, une très forte valeur. Ce maximum, comme le montre la figure 10, correspond exactement à l'annulation des sulfates. Ces sulfates,

qui se sont maintenus à peu près constants pendant les huit premiers jours, diminuent rapidement et régulièrement jusqu'à s'annuler complètement.

Le début du dégagement de l' H_2S correspond au noircissement de la solution, qui est suivi, six jours après, d'un dégagement de bulles qui viennent se fixer sous la couche de vaseline. Si la quantité d' H_2S après avoir atteint son maximum diminue lentement, c'est

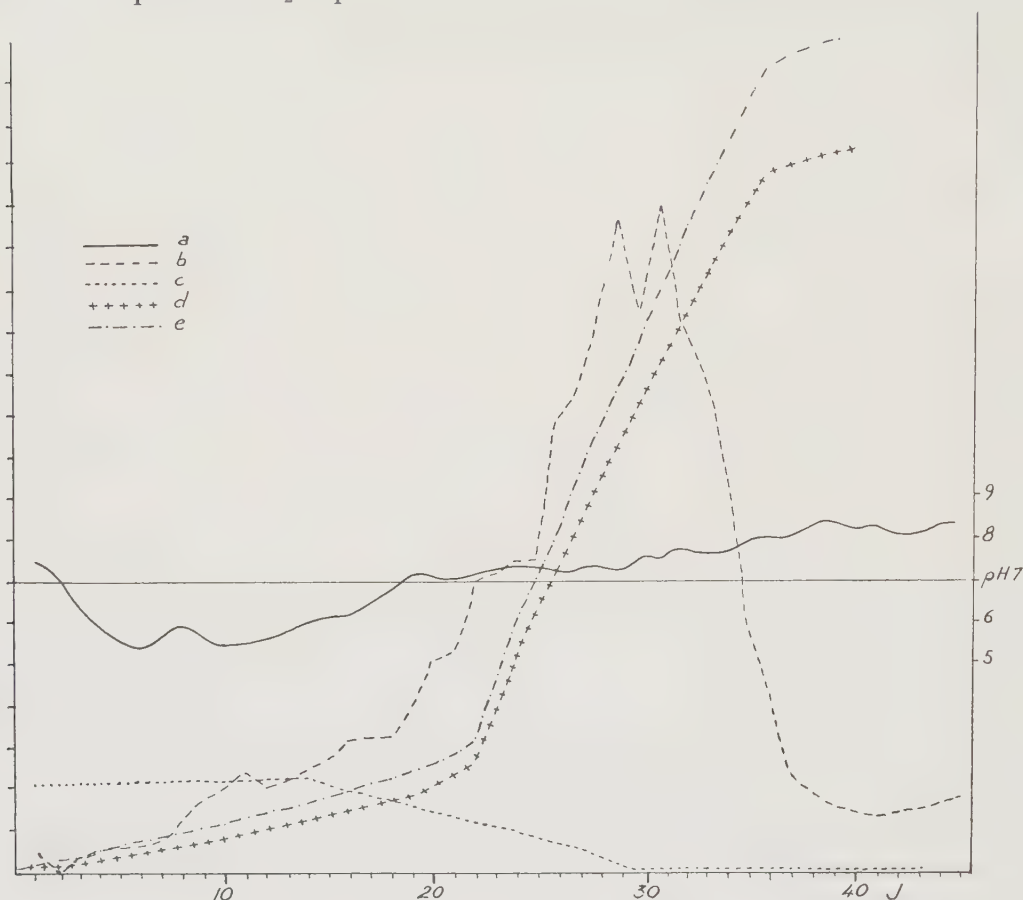


FIG. 11. — Ensemble des résultats des mesures de pH, dosages de l' H_2S dissous et de SO_4 au cours de la formation d'un voile de carbonates.

1 division en ordonnées = 1 unité pH (a); = 20 mg $\text{S}\%$ (b); = 1 g $\text{SO}_4\%$ (c); = 0,2 g carbonates (d); = 5 % carbonates (e).

probablement qu'il y a tout de même, à la longue, une diffusion à travers l'huile de vaseline. En effet, à ce moment là on note la disparition des bulles et une odeur d' H_2S se dégage du bocal.

Résultats obtenus dans l'aquarium X. — Dans le cas de cet aquarium où un constant barbotage d'air est entretenu, il est évident que les dosages d' H_2S auront peu de valeur. Ici, le dégagement ne commence que le dixième jour, au moment même où le liquide commence à se troubler; des valeurs très peu différentes sont enregistrées jusqu'au trentième jour, à partir duquel l' H_2S se dégage beaucoup plus abondamment.

La quantité de sulfates, après être restée à peu près constante jusqu'au vingt-

deuxième jour, diminue ensuite lentement; et lorsque cette valeur est complètement nulle dans l'aquarium II, elle est encore de 1 g, soit le tiers de sa valeur initiale dans l'aquarium X.

Les carbonates formés se déposent sous forme pulvérulente sur les bords de l'aquarium, et sur les supports qu'ils peuvent trouver, tel le diffuseur, ou même la surface de la vase; il n'a pas été possible de les récupérer.

Variation du pH au cours de la formation du voile de carbonates. — Au cours des expériences précédentes, il ne m'avait pas été possible, pour des raisons matérielles, de faire des mesures de pH, celles-ci ont été faites, sur un aquarium analogue, un peu plus tard. Les résultats sont donnés figure 11. Les dosages d' H_2S et de SO_4 ont été faits en même temps.

Pendant les six premiers jours, alors que les quantités de sulfates et d'hydrogène sulfuré sont à peu près constantes, le pH diminue rapidement; de 7,5 le jour de la mise en culture, il descend jusqu'à 5,4. Cette phase correspond au dégagement de l'odeur de fermentation, et la diminution de pH est due à la libération du CO_2 , au cours de la destruction du glucose. Puis, lorsque le H_2S commence à se dégager et à se fixer en partie sur le fer en suspension, donnant sa couleur noire au liquide, le pH remonte progressivement pour se stabiliser aux environs de 7 jusqu'à l'annulation des sulfates. Le fer jouerait donc ici le rôle de tampon et fixerait le H_2S sous forme de monosulfure de fer très instable. En effet, ce dépôt noir qui se forme sur les parois de l'aquarium et sur la surface de la vase, recueilli et séché à l'étuve, redevient immédiatement rouille.

Lorsque le pH est remonté à des valeurs d'environ 7, et que le dégagement d' H_2S est très important, il commence à se former dans la vase des taches rose lie de vin, indiquant le développement de colonies de thiorhodobactéries. Le voile de carbonates se forme abondamment entre les pH 7 et 8, puis l'aquarium est complètement envahi par la teinte rose qui colore même complètement l'eau. A partir de ce moment, la partie de l'évolution qui nous intéresse est pratiquement terminée; en effet, le dégagement d' H_2S cesse brusquement, il n'existe plus de sulfates, et le voile de carbonates ne se forme plus.

2. — Variation des différents facteurs.

Après avoir, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, examiné le phénomène dans son ensemble, il m'a paru intéressant de voir quels étaient les facteurs qui pouvaient activer ou, au contraire, retarder, ou même annuler la précipitation des carbonates dans l'eau de mer.

Au cours de ce chapitre, je donnerai donc les résultats que j'ai obtenus en faisant varier les facteurs suivants, qui sont d'ailleurs presque tous susceptibles d'intervenir dans la nature : éclairage, température, concentration en matière organique, concentration en sulfates (qui nous amènera à envisager la possibilité de précipitation dans les marais salants), afin de déterminer quelles sont les conditions optimum réclamées pour obtenir la meilleure « productivité ».

a) VARIATION DE L'ÉCLAIREMENT. — Les expériences citées précédemment ont toutes été faites à la lumière du jour. J'ai donc essayé, pour étudier l'effet des variations de la

lumière sur la productivité en carbonates, de mettre des cultures en lumière continue, d'une part, et dans l'obscurité, d'autre part. Ces résultats peuvent être comparés avec ceux obtenus à la lumière du jour.

L'aquarium I contient de la vase noire et de l'eau de mer glucosée à 0,5 % et est laissé à la lumière du laboratoire, l'expérience s'étant déroulée pendant les mois de mai-juin à Villefranche-sur-Mer, on peut compter sur un éclaircissement de quinze heures par jour.

L'aquarium I' est identique, mais l'eau de mer n'est pas glucosée, il est conservé dans un placard éclairé avec un tube fluorescent de 16 watts.

L'aquarium II contient de la vase noire et 3 l. d'eau de mer glucosée à 0,5 %, et est conservé en lumière constante.

L'aquarium VI, identique à l'aquarium I', est conservé dans le noir, et l'aquarium VII, identique à l'aquarium II, est conservé dans le noir.

Les aquariums I' et VI, qui ne contiennent pas de glucose, ont, comme on l'a vu pour de tels aquariums laissés à la lumière du jour, conservé le même aspect au cours de toute la série d'expériences. Je ne donnerai donc pas ici les courbes de sulfates et d'hydrogène sulfuré qui ne feraient que charger le graphique sans grand intérêt.

D'après les graphiques de la figure 12, on peut voir tout de suite une grande différence dans la productivité en carbonates. Alors que, dans les aquariums I et II, il y a une forte productivité (elle peut être considérée comme équivalente dans les deux aquariums, car il n'y a que 2,5 l. d'eau de mer dans l'aquarium I, contre 3 l. dans l'aquarium II), on n'obtient que très peu de carbonates dans l'aquarium VII, le chiffre de 0,6 g est même nettement en excès, le voile étant, beaucoup plus que les deux autres, composé d'hydroxyde de fer et de matière organique; mais il ne nous est pas possible de les dissocier sur de si faibles quantités. La seule différence qu'on peut remarquer entre ces deux aquariums est une activité plus rapide dans l'aquarium laissé à la lumière du jour. Ce fait, comme on le verra plus loin, doit plutôt être imputé à une température plus élevée dans l'aquarium I. En effet, celui-ci se trouvait, pendant une bonne partie de la journée, en plein soleil.

Un fait remarquable cependant, dans cette série de cultures, est que si on n'a pas productivité de carbonates dans l'aquarium conservé à l'obscurité, on a tout de même un dégagement d'hydrogène sulfuré et une annulation presque totale des sulfates. Donc, même à l'obscurité, la première partie du phénomène pourrait se développer, il n'y a que la formation du voile qui nécessite la lumière.

Etant donnée la correspondance des cultures en lumière du jour et en lumière continue, je ne travaillerai plus qu'en lumière du jour, ce qui, pratiquement, est beaucoup plus simple.

b) VARIATION DE LA TEMPÉRATURE. — Deux séries d'expériences ont été faites pour étudier l'action de la température sur le phénomène de formation des voiles de carbonates.

Dans la première série, j'ai mis en culture, parallèlement, un bécher (1) contenant de la vase et de l'eau de mer glucosée à une température de 20°, un bécher (1') identique est laissé au bain-marie à 30°, un bécher (2) identique à 40°, un bécher (3) identique à 50°, un bécher (4) identique à 60°, un bécher (5) identique à 70°.

Les deux premiers béchers ont suivi une évolution à peu près identique, comme on peut le voir sur le graphique de la figure 13, avec une légère tendance à l'accélération pour le bécher 1'; les deux béchers ont donné une quantité de carbonates d'environ 0,7 g.

Dès le bécher 2, à 40° on observe une très nette différence; le voile, au début, se forme beaucoup plus rapidement; il est bien cristallin, mais, dans ces conditions, on ne peut obtenir plus de 0,34 g de carbonates, soit environ la moitié de la productivité totale.

A 50° (bêcher 3), l'accélération du phénomène est encore beaucoup plus marquée, puisque le 10^e jour on obtient déjà la presque totalité des carbonates; mais la formation s'arrête là.

Le bêcher 4 (60°) n'arrive à former que 0,25 g de carbonates. A 70°, on obtient le même résultat que précédemment.

D'après ces résultats, on serait tenté de conclure que, dès 40°, la formation des carbonates, bien qu'accélérée au début, est limitée en quantité. Cependant, il était logique de penser que, la température augmentant, le CO₂, résultat de l'activité bactérienne, se libé-

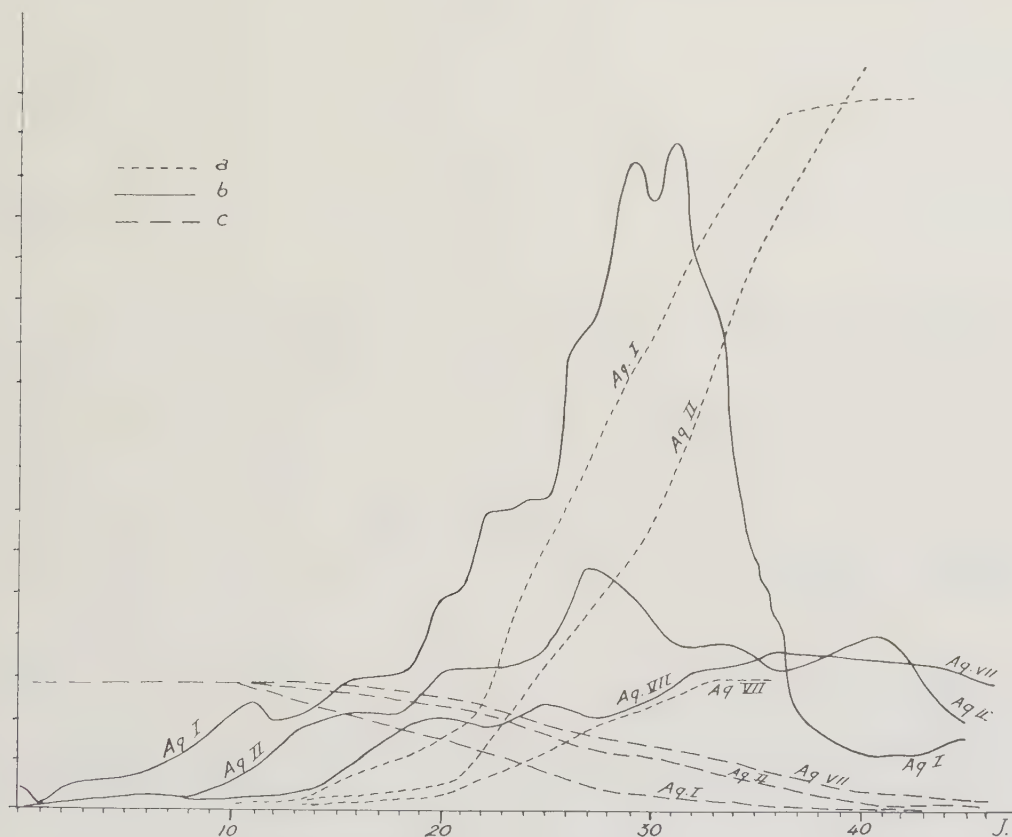


FIG. 12. — Action de la lumière sur la formation des carbonates. Aquarium I : lumière du jour; aquarium II : lumière constante; aquarium VII : obscurité.
1 division en ordonnées = 0,2 g carbonates (a); = 0,02 g S‰ (b); = 0,1 g SO₄ % (c).

rait plus rapidement dans l'air, et que, après avoir accéléré le phénomène en permettant une transformation plus rapide des bicarbonates en carbonates, ce phénomène pouvait amener une pénurie de CO₂ dans le milieu et empêcher la formation de tous les carbonates. C'est pourquoi, dans tous les bêchers qui avaient terminé leur formation de carbonates, en donnant des quantités inférieures à celle du bêcher 1, j'ai rajouté du glucose. Le résultat a été satisfaisant pour les bêchers 2 et 3; le voile a recommencé à se former et la quantité finale s'est trouvée, à peu de choses près, identique à celles des bêchers 1 et 1'. Par contre, pour les bêchers 4 et 5, respectivement à 60 et 70°, l'addition de glucose a été sans résultats. Il y avait donc là une autre raison d'arrêt du phénomène. A ces tem-

pératures là, il était possible d'envisager simplement une impossibilité de survie des bactéries au bout d'un laps plus ou moins grand de temps. C'est pourquoi, j'ai recommencé les mêmes expériences en laissant préalablement les béchers, sans addition de glucose pendant quinze jours aux températures de 50, 60 et 70°. Dans le bécher à 50°, on a eu une très légère formation d'un voile ocre foncé, après addition du glucose, et dans les deux autres aucune formation de voile.

Pour compléter cette étude, j'ai mis deux erlenmeyers contenant de la vase et de

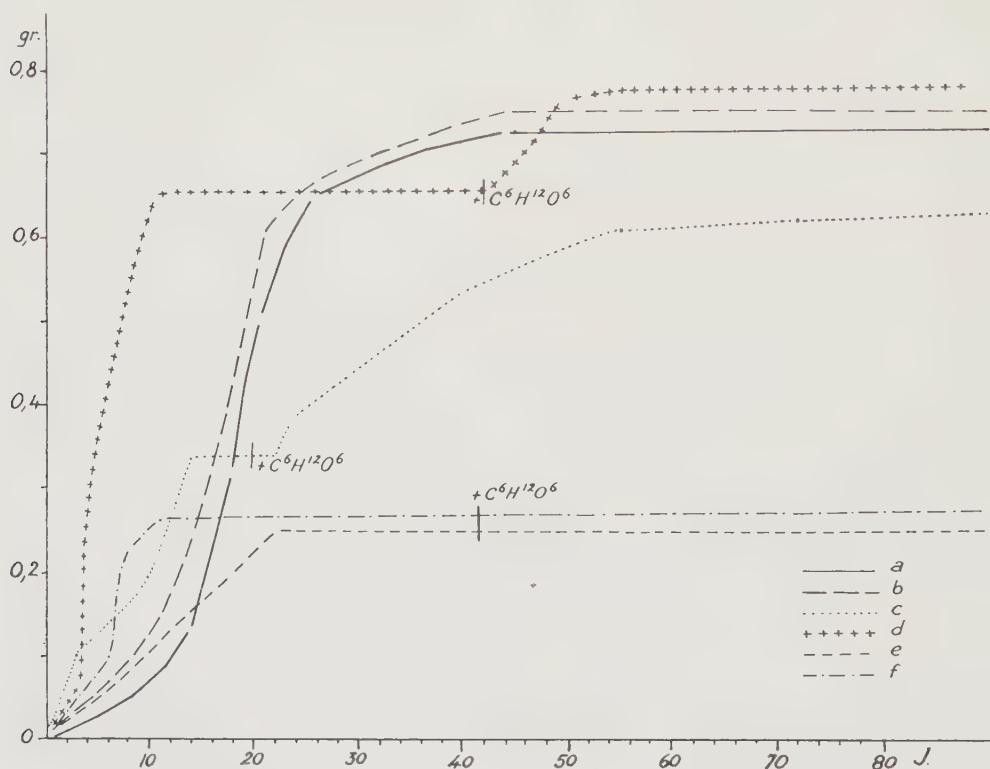


FIG. 13. — Variation de la productivité en carbonates, en fonction de la température.
a, bécher 1, 20°; b, bécher 1', 30°; c, bécher 2, 40°; d, bécher 3, 50°; e, bécher 4, 60°; f, bécher 5, 70°.

l'eau de mer à la glacière, à environ 1° C. Au bout de quinze jours, j'ai ajouté du glucose dans les deux erlenmeyers; l'un a été sorti de la glacière alors que l'autre y était laissé. Le premier erlenmeyer a suivi une évolution normale après sa sortie de la glacière, alors que le deuxième n'avait pas encore donné la moindre indication de formation de voile lorsque le premier avait fini son évolution. Cependant, on ne peut considérer ces indications comme formelles, car, n'ayant pas eu la possibilité d'éclairer la glacière, le facteur lumière entre en jeu.

Cependant, le hasard est venu confirmer cette hypothèse; en effet, au cours du mois de février, je m'étais fait envoyer de la vase et de l'eau de mer de Villefranche à Paris et il s'est trouvé que le tout a gelé complètement pendant le transport. Aucune des cultures essayées avec cette vase et cette eau de mer n'ont donné de résultats.

En résumé, on peut dire que la précipitation des carbonates peut se produire jusqu'à

une température de 50°, à condition qu'il y ait un apport régulier de matière organique. Par contre, à des températures supérieures, les bactéries responsables de ces phénomènes sont tuées. Le maximum de productivité semble se trouver aux alentours de 30°. Ce fait a pu être vérifié de nombreuses fois au cours des expériences : les cultures faites à Villefranche aux mois de mai et de juin se sont toujours développées beaucoup plus rapidement que celles faites à Paris ou à Villefranche en hiver.

Les basses températures ne semblent pas empêcher le phénomène, à condition de ne pas être permanentes et de ne pas atteindre la congélation.

Au sujet des cultures à 70°, un fait important mérite d'être signalé. Dans le béccher laissé à 70° sans addition de glucose pendant quinze jours, on a eu, dès le second jour, la formation d'un voile nettement calcaire et bien cristallisé de 0,015 g; une fois celui-ci enlevé, on n'a pu mettre en évidence aucune autre formation de voile. Ceci tendrait à prouver qu'il existe dans l'eau de mer des bicarbonates en solution, et qu'une température de 70° a pour effet de laisser la tension en CO_2 , au point de transformer ceux-ci en carbonates.

c) VARIATION DE LA CONCENTRATION EN GLUCOSE. — Les expériences sur l'action de la concentration en glucose, correspondant dans la nature à la richesse des sédiments en matière organique assimilable, ont été faites en deux séries :

La première série comprenait les concentrations de 0,1 à 1 g pour 100 cm^3 d'eau de mer, ils sont indiqués sous les symboles : B. 0,1, B. 0,2, B. 0,3, B. 0,4, B. 0,5, B. 0,6, B. 0,7, B. 0,8 B. 0,9 B. 1.

La deuxième série comprenait des concentrations de 0,5 % à 20 %, réparties dans des erlenmeyers contenant 150 cm^3 d'eau de mer. Les symboles en sont les suivants : E. 33, 0,5 %; E. 34, 1 %; E. 35, 2 %; E. 36, 3 %; E. 37, 4 %; E. 38, 5 %; E. 39, 6 %; E. 40, 7 %; E. 41, 8 %; E. 42, 9 %; E. 43, 10 %; E. 44, 15 %; E. 45, 20 %.

D'après les deux graphiques (fig. 14 et 15), on voit que, pour des valeurs supérieures à 0,5/1 %, le début de la formation du voile est retardé; ceci s'explique par le plus grand laps de temps nécessaire aux bactéries pour décomposer tout le glucose; laps de temps qui correspond, comme on l'a vu plus haut, à une baisse très nette de pH. Celui-ci atteint des valeurs voisines de 5, auxquelles il est impossible d'avoir une cristallisation de carbonates. Cependant, une fois que la cristallisation a pu commencer, elle se continue dans tous les cas très régulièrement et complètement. Les erlenmeyers contenant de grandes quantités de glucose suivent le processus habituel; dès que la cristallisation est terminée, on voit, là aussi, apparaître la teinte rose lie de vin des thiorhodobactéries.

Dans la série de bécchers dont les concentrations sont comprises entre 0,1 et 1 %, par contre, on n'a pas un retard appréciable dans le début de cristallisation. Comme on le voit sur la figure 15, ce début se présente au même moment pour les concentrations de 1 à 0,3 %, mais on n'obtient pas pour certains de ces bécchers une cristallisation complète; alors qu'on obtient des valeurs comprises entre 1,5 g et 2 g pour les concentrations supérieures à 0,5 %, on n'obtient que 0,2 g pour une concentration de 0,1 %, 0,8 g pour 0,2 %, 0,9 g pour 0,3 %, et 1 g pour 0,4 %.

Il semble donc que, dans ce cas là, le CO_2 dégagé n'est pas en quantité suffisante pour pouvoir se combiner à tous les cations présents en solution.

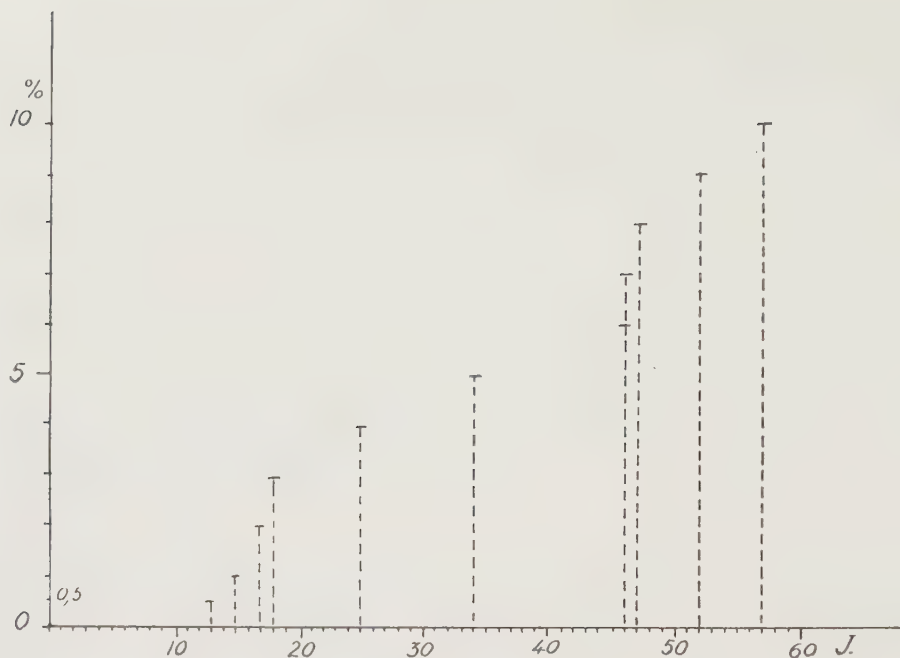


FIG. 14. — Variation du début de formation du voile en fonction de la concentration en glucose (concentrations de 0,5 à 10 %).

En abscisse : jours de culture; en ordonnées : concentrations en glucose (%).

En résumé, il ne semble pas, sur toute l'étendue des concentrations que j'ai étudiées, y avoir de concentrations empêchant la productivité en carbonates, mais seulement des

concentrations trop faibles pour permettre la productivité maximum en carbonates.

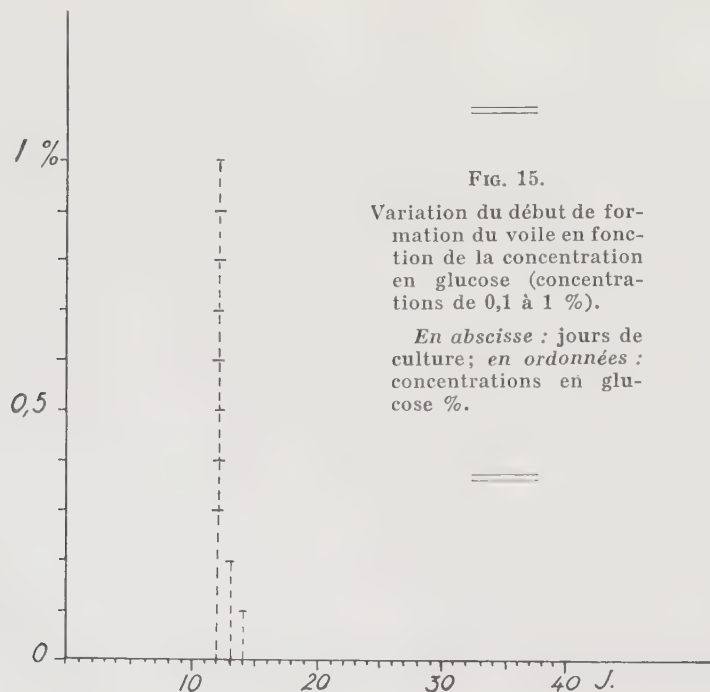


FIG. 15.

Variation du début de formation du voile en fonction de la concentration en glucose (concentrations de 0,1 à 1 %).

En abscisse : jours de culture; en ordonnées : concentrations en glucose %.

d) VARIATION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE OFFERTE. —

Le glucose ayant été pris arbitrairement comme « enrichissant », il fallait vérifier si d'autres substances organiques avaient le même effet sur la productivité en carbonates. C'est pourquoi, sur le même principe, une série de cultures a été mise en expérience au cours du mois de mars 1954.

Les cultures aquarium ont été faites dans des béciers en Pyrex de 600 cm³. Chaque

bécher contenait 150 g de vase noire du fond de la baie de Villefranche et 250 cm³ d'eau de mer enrichie avec les substances organiques carbonées suivantes :

Polysaccharides :

Inosite	Bécher 5
Mannite	Bécher 6
Sorbitol	Bécher 7
Dulcitol	Bécher 8

Dissaccharides :

Glucose	Bécher 9
Lévéulose	Bécher 10
Mannose	Bécher 11
Galactose	Bécher 12

Pentoses :

Xylose	Bécher 13
Arabinose	Bécher 14

Méthylpentoses :

Rhamnose	Bécher 15
----------------	-----------

Hexoses :

Saccharose	Bécher 16
Maltose	Bécher 17
Lactose	Bécher 18

Polyalcools :

Dextrine	Bécher 19
----------------	-----------

Les concentrations en ces divers produits organiques ont été calculées de façon à être équivalentes en carbone, c'est-à-dire de façon que leur décomposition donne naissance à la même quantité de CO₂ dégagé.

L'action de ces substances nutritives a été mesurée par la « productivité » en carbonates, comme cela a été fait dans toutes les expériences précédentes.

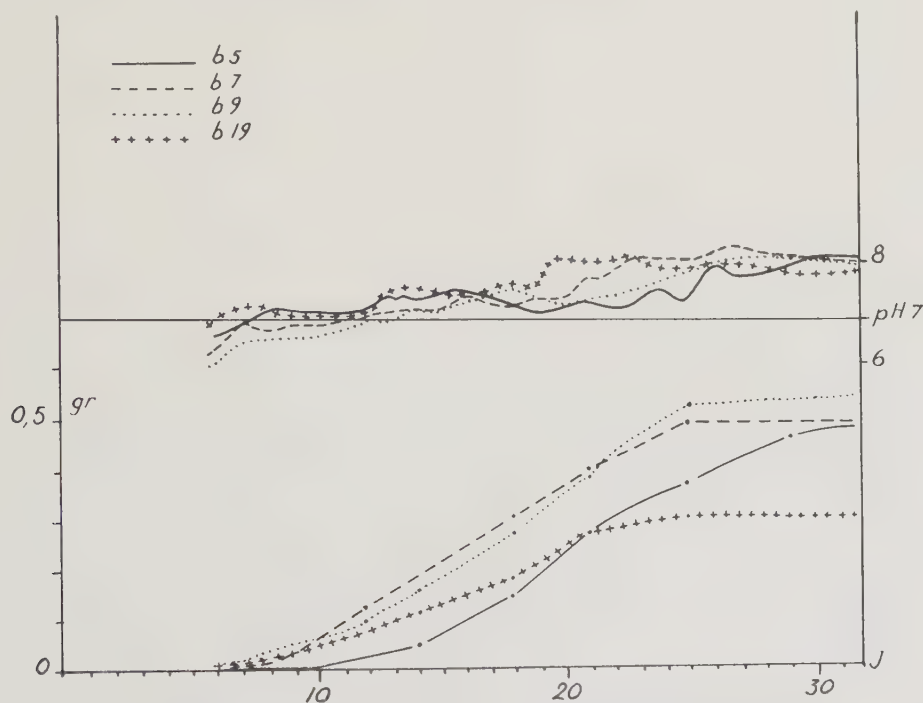


FIG. 16. — Variations du pH et de la quantité de carbonates formés en fonction de la matière organique offerte (b5, inosite; b7, sorbite; b9, glucose; b19, dextrine).

Dans tous les béchers, les résultats ont été positifs, et, aux erreurs de pesée près, qui ont été expliquées précédemment, la productivité est la même pour toutes les substances, la seule différence que l'on a pu mettre en évidence est dans la rapidité d'évolution de ce phénomène.

Dans le cas de la sorbite, du maltose, du lactose et de la dextrine, dès le neuvième jour de culture, il existe un voile récupérable; alors que, pour les autres, ce voile n'est récupérable qu'au bout du treizième jour et même du quinzième jour pour l'inosite et le rhamnose.

Le maximum de productivité, dans tous les cas, se trouve aux alentours de 0,5 g; ce chiffre est atteint pour le maltose au bout du vingt et unième jour de culture, alors qu'il faudra attendre le vingt-cinquième jour pour tous les autres, excepté l'inosite pour laquelle cette valeur n'a été atteinte qu'au bout de trente-deux jours. De tous ces produits, seule la dextrine n'a pu donner que 0,3 g de carbonates. Afin de ne pas surcharger le graphique de la figure 16, je n'ai donné que les courbes typiques du glucose comme référence, de la sorbite, de l'inosite et de la dextrine. Ces courbes de productivité sont accompagnées des courbes de pH qui, là encore, montrent bien une différence de comportement entre la dextrine et les autres. En effet, la courbe de la culture enrichie en dextrine donne, dès le départ, des valeurs de pH plus élevées, et les valeurs voisines de 8 sont beaucoup plus rapidement atteintes.

Action de divers produits azotés. — De nombreux auteurs ayant lié la précipitation des carbonates dans l'eau de mer et dans les sédiments à la présence de substances organiques azotées, j'ai fait des essais comparatifs dans les mêmes conditions expérimentales avec diverses substances azotées : urée, bécher 1; peptone, bécher 2; asparagine, bécher 3; glycocolle, bécher 4. Dans aucun des quatre cas, on n'a pu mettre en évidence la formation d'un voile important de carbonates. Dans l'ensemble, on s'est trouvé en présence, dès le sixième jour, d'un voile organique plus ou moins important (très important dans le cas de la peptone) contenant quelques rares éléments faisant effervescence à l'acide chlorhydrique. Dans le cas de l'urée et de la peptone, une fois ce voile enlevé, il n'y a plus eu aucune formation de voile, tandis que, dans le cas de l'asparagine et du glycocolle, on a eu une légère formation (atteignant 0,2 g) de voile très cristallin, mais le chiffre de 0,5 g obtenu avec les substances carbonées n'a jamais pu être atteint. Si l'on compare les formules de ces différents produits, on voit que le glycocolle et l'asparagine contiennent une assez grande proportion de carbone, alors que celle-ci est insignifiante dans le cas de l'urée et de la peptone. Par conséquent, ce serait le carbone de ces deux produits, et non l'azote, qui serait responsable, comme dans tous les autres cas, de la formation des carbonates. La faible valeur de carbonates obtenue dans le cas du glycocolle et de l'asparagine vient donc de ce que ces solutions n'ayant pas été calculées en équivalent de carbone, on se retrouve dans les mêmes conditions que dans les expériences faites avec de faibles quantités de glucose, comme nous l'avons vu précédemment.

Parallèlement à ces mesures de productivité, j'ai effectué quotidiennement des mesures de pH.

D'après les résultats obtenus, qui sont consignés dans les courbes de la figure 17, on constate que le pH a tendance à augmenter tout au long des expériences, malgré le dégagement d'hydrogène sulfuré; on n'obtient pas, au début de l'expérience, cette forte diminution attribuée au dégagement de CO_2 . On constate que, dans les deux cas (b1 et b2) où l'on n'a pas eu formation de carbonates, le pH est pratiquement toujours supérieur à 8, et que dans les deux autres béchers (b3 et b4) où l'on a eu une formation partielle de carbonates, on a, au début, une légère inflexion de la courbe, correspondant à un léger dégagement de CO_2 , mais que très rapidement, comme dans les cas de concentrations en glucose inférieures à 0,4 %, on obtient des valeurs voisines de 8.

Il semble donc que les substances azotées n'influencent pas la formation des carbonates, sauf dans la mesure où elles contiennent des quantités de carbone suffisamment importantes. D'autre part, lorsqu'il n'y a plus eu formation de voile dans aucun des 19 béchers, j'ai procédé à un essai des sulfates; cet essai, négatif pour tous les béchers ayant donné 0,5 g de carbonates, et même dans le bécher 19 où la formation du voile a été incomplète, est fortement positif pour les béchers 1 à 5 contenant les substances azotées.

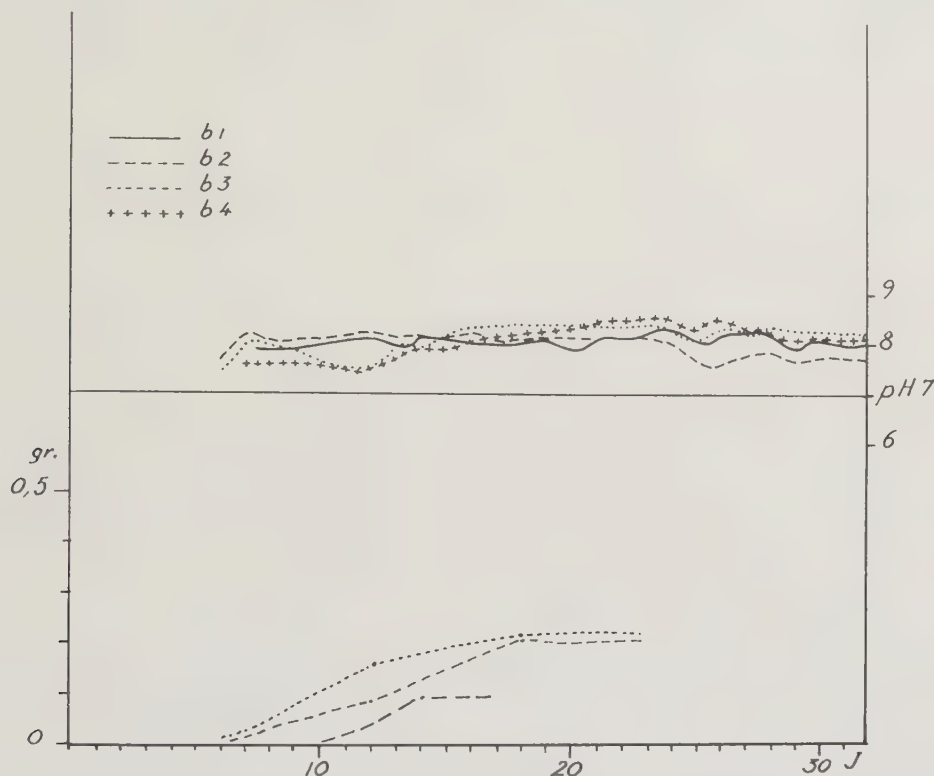


FIG. 17. — Variations du pH et de la quantité de carbonates formés par enrichissement en matières azotées (b1, urée; b2, peptone; b3, asparagine; b4, glycocolle).

Ceci prouve que toutes les substances carbonées permettent la réduction totale des sulfates, et que, dans le bécher 19, c'est seulement la quantité de CO_2 dégagée qui est responsable de la formation incomplète des carbonates, alors que, dans le cas des enrichissements en substances azotées, c'est que celles-ci sont insuffisantes comme aliment pour permettre un bon développement des bactéries sulfato-réductrices.

J'ai, d'autre part, essayé de voir si l'addition de substance azotée à une culture contenant déjà du glucose donnait une accélération dans le développement du phénomène; c'est pourquoi j'ai enrichi une culture aquarium avec du glucose et de la peptone. Les quantités de carbonates formées dans ce bécher et dans un bécher témoin ne contenant que du glucose sont sensiblement équivalentes, tout au plus peut-on constater un léger retard pour le bécher contenant de la peptone.

Pour vérifier si l'on arrivait à obtenir le phénomène en donnant comme source éner-

gétique une substance moins directement assimilable que les sucres précédents, j'ai fait la même culture en ajoutant à l'eau de mer, au lieu de glucose, 1 g de papier Joseph, lacéré dans l'eau de mer.

L'évolution de cette culture a été beaucoup plus lente que dans les cas précédents, ce n'est qu'au bout d'un mois qu'il s'est formé un voile blanc gluant, mais donnant une légère effervescence à l'acide chlorhydrique. Une fois ce premier voile enlevé, il s'est reformé régulièrement un voile cristallin, mais pas très dense; il donnait, en surface de la culture, des figures identiques à des fleurs de neige. Même lorsque la réaction est bien démarrée, le voile se forme beaucoup plus lentement que dans les cas précédents.

Cette action plus lente s'explique aisément par le fait que, dans ces conditions, on fait entrer en jeu un autre cycle bactérien, celui des bactéries cellulolitiques, les autres cycles ne pouvant prendre place qu'après une action assez prolongée de ces bactéries. A la fin de l'expérience, on ne retrouve plus, en surface de la vase, que quelques rares flocons de papier Joseph, très altérés.

e) VARIATION DE LA CONCENTRATION EN SULFATES. — Le phénomène de production des carbonates se faisant aux dépens des sulfates présents dans l'eau de mer, il m'a paru intéressant de faire varier cette quantité.

Ayant vu dans les chapitres précédents que le rapport entre la quantité de sulfates à réduire et la quantité de CO_2 libéré avait une grande importance, j'ai mis parallèlement en culture des béciers contenant de la vase de Villefranche et de l'eau de mer glucosée à 0,5 %, additionnée de faibles quantités de sulfates, et les mêmes béciers, contenant le double de glucose, ce qui était une quantité nettement suffisante, puisque je n'avais pas doublé la quantité de sulfates.

Les béciers suivants ont été mis en culture :

- Bécher 1 : vase noire + eau de mer glucosée à 0,5 % (témoin).
 » 8 : vase noire + eau de mer glucosée à 0,5 % + 0,3 %, SO_4Mg .
 » 9 : vase noire + eau de mer glucosée à 1 % + 0,3 %, SO_4Mg .
 » 10 : vase noire + eau de mer glucosée à 0,5 % + 0,3 %, SO_4Fe .
 » 11 : vase noire + eau de mer glucosée à 1 % + 0,3 %, SO_4Fe .

Les courbes de la figure 18 montrent de façon évidente que c'est seulement la quantité de CO_2 dégagé qui limite le phénomène; en effet, les résultats obtenus dans les béciers 1, 8 et 10 peuvent être considérés comme identiques, alors que les béciers 9 et 11, qui contiennent plus de glucose, présentent une beaucoup plus grande « productivité » en carbonates.

f) PRÉCIPITATION DES CARBONATES DANS LES MARAIS SALANTS. — Ayant pu me procurer des vases des « égouts » des salins des Pesquiers (presqu'île de Giens), j'ai essayé de les mettre en culture pour obtenir des carbonates.

Ces égouts sont les rigoles d'épandage qui entourent les zones d'évaporation proprement dites.

Au moment de la récolte de ces échantillons, la teneur en sulfates était environ double de celle de l'eau de mer, la salinité atteignait 91,703 ClNa %.

La vase est très noire, répandant une forte odeur d'hydrogène sulfuré; il pousse une abondante flore hallophyle, et la vase est peuplée de très grandes quantités d'*Arthemia Salina*.

Des expériences ont été faites avec les milieux suivants :

- 1° Vase des égouts + eau des salins (témoin).
- 2° Vase des égouts + eau des salins glucosée à 0,5 %.
- 3° Vase des égouts + eau de mer glucosée à 0,5 %.
- 4° Vase de Villefranche + eau des salins glucosée à 0,5 %.

Le premier b cher ne nous a donné aucun changement, le deuxième a produit 0,40 g de carbonates, le troisième 0,27g et le quatrième 0,93 g. Donc, il existe certainement des bactéries sulfato-réductrices dans les salins, l'eau contenant plus de sulfates que l'eau de mer; la production de carbonates est plus importante avec l'eau des égouts qu'avec l'eau de mer; mais, si l'on considère les résultats obtenus dans le b cher 4, il semble que les bactéries de la vase de Villefranche soient capables de s'adapter, au moins pour un assez court laps de temps, à ce milieu sursal  et qu'elles sont plus actives que les bactéries des salins.

J'ai, d'autre part, essayé des cultures avec des quantités plus importantes de glucose;

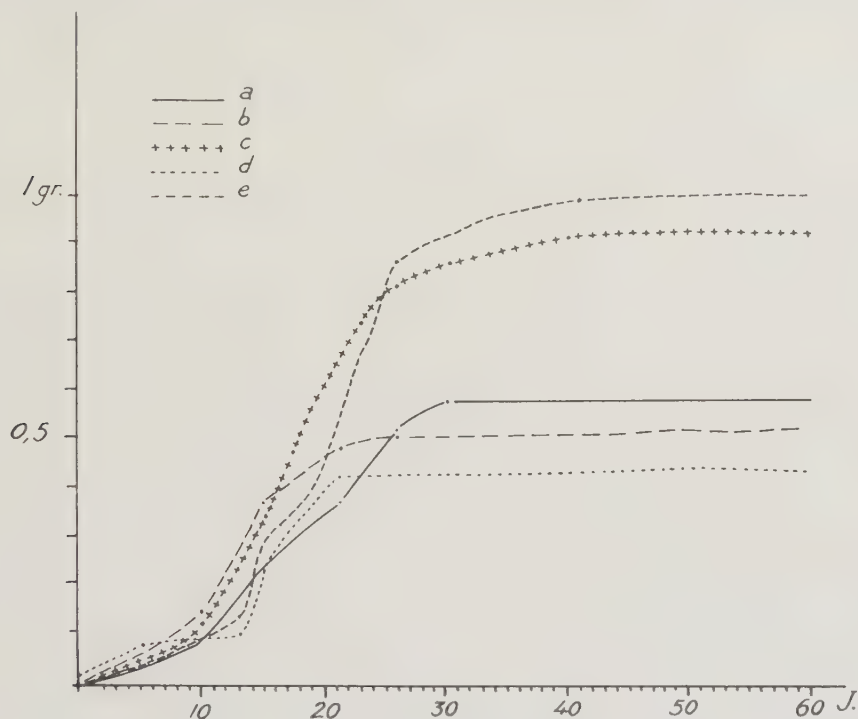


FIG. 18. — Variations de la quantité de carbonates formés en fonction de l'addition de divers sulfates (a, b cher 1, 0,5 % $C_6H_{12}O_6$; b, b cher 8, id.   1 + 0,3 % SO_4Mg ; c, b cher 9, 1 % $C_6H_{12}O_6$ + 0,3 % SO_4Mg ; d, b cher 10, 0,5 % $C_6H_{12}O_6$ + 0,3 % SO_4Fe ; e, b cher 11, 1 % $C_6H_{12}O_6$ + 0,3 % SO_4Fe).

les résultats sont peu satisfaisants. On obtient bien des carbonates, mais les voiles ne sont jamais bien cristallisés, ils restent mous et très riches en matière organique. D'autre part, les quantités de voile recueillies dans ces conditions ne sont jamais proportionnelles à la concentration en sulfate.

Il semble donc que de trop grandes concentrations d'eau de mer soient inhibitrices de ce phénomène.

C'est pour confirmer cette hypothèse que, dans le chapitre suivant, je vais essayer de travailler en concentrations diverses d'eau de mer.

g) RÔLE DE LA CONCENTRATION DE L'EAU DE MER. — Comme je l'ai dit au chapitre précédent, ces expériences ont été faites en vue de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse sur l'inhibition des bactéries sulfato-réductrices par de trop grandes concentrations d'eau de mer.

Pour ce faire, j'ai mis en culture 7 béciers contenant :

- 1° Vase noir + eau de mer glucosée à 0,5 % (témoin).
- 2° Vase noir + eau de mer concentrée 2 fois, glucosée à 0,5 %.
- 3° Vase noir + eau de mer concentrée 2 fois, glucosée à 1 %.
- 4° Vase noir + eau de mer concentrée 3 fois, glucosée à 0,5 %.
- 5° Vase noir + eau de mer concentrée 3 fois, glucosée à 1,5 %.
- 6° Vase noir + eau de mer concentrée 4 fois, glucosée à 0,5 %.
- 7° Vase noir + eau de mer concentrée 4 fois, glucosée à 2 %.

La figure 19 donne les variations de la quantité de carbonates formés dans ces divers cas.

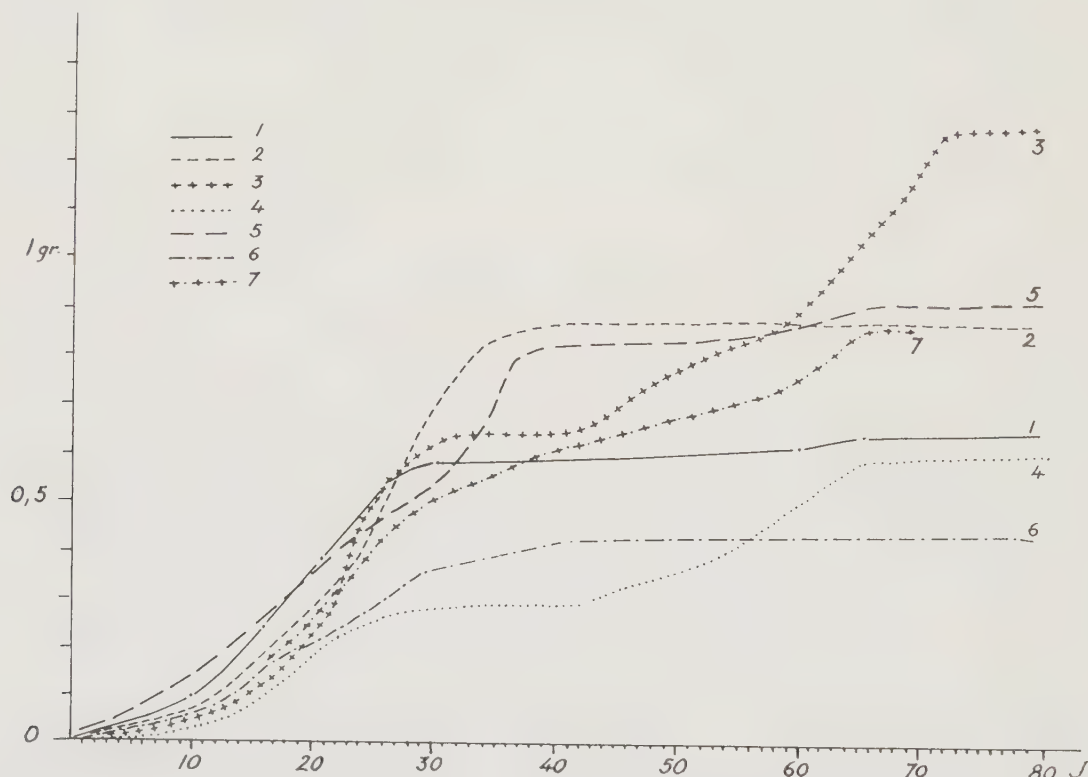


FIG. 19. — Influence de la concentration de l'eau de mer et de la concentration relative en glucose sur la formation des carbonates.

1, eau de mer + 0,5 % glucose; 2, eau de mer $\times$ 2 + 0,5 % glucose; 3, eau de mer $\times$ 2 + 1 % glucose; 4, eau de mer $\times$ 3 + 0,5 % glucose; 5, eau de mer $\times$ 3 + 1,5 % glucose; 6, eau de mer $\times$ 4 + 0,5 % glucose; 7, eau de mer $\times$ 4 + 2 % glucose.

En premier lieu, ces expériences vérifient une fois de plus que la quantité de carbonates formés est en grande partie tributaire de la quantité de glucose offerte par rapport à la quantité de sulfates existant. En effet, on a chaque fois une meilleure productivité pour le bécier contenant plus de glucose.

En second lieu, l'hypothèse émise pour les marais salants semble se confirmer. En effet, si l'on a bien une augmentation de carbonates pour les cultures contenant de l'eau de mer concentrée 2 fois, il n'en est pas de même pour l'eau de mer concentrée 3 et 4 fois; au contraire, les courbes 3, 5 et 7 donnent des valeurs maxima inverses de la concentration de l'eau de mer. Il faut même ajouter que les valeurs données pour les béciers 6 et 7 sont nettement trop fortes, car il a été impossible d'obtenir de beaux voiles, ceux-ci sont toujours restés très chargés en fer et très peu cristallins.

3. — Rôle du CO_2 .

Comme les expériences précédentes viennent de le démontrer, les ions calcium ou magnésium, libres en solution, doivent donc être mis en présence d'une quantité suffisante de gaz carbonique pour pouvoir former des carbonates ou des bicarbonates. D'après un certain nombre d'expériences faites dans diverses conditions, et citées précédemment, il semble qu'on puisse donner les explications suivantes : le gaz carbonique qui est libéré en grande quantité au début de la culture par la décomposition bactérienne de la matière organique carbonée, donnée comme aliment, est mis en évidence par les mesures de pH. Pendant toute la première phase des expériences, avant le début de formation du voile, ce gaz carbonique en excès, donnant un milieu acide, empêche la formation des carbonates. Le calcium et le magnésium se trouvent en solution à l'état de bicarbonates. En surface, la tension de CO_2 diminuant, il peut se former une cristallisation de carbonates.

Plusieurs des faits énoncés dans les parties précédentes viennent corroborer ces hypothèses. En effet, plus on met de glucose dans la solution surnageante, plus le voile met de temps à se former, car plus il y a de gaz carbonique en excès qui doit être évacué pour permettre la cristallisation des carbonates. D'autre part, dans les expériences faites sur la nécessité d'une aération de la surface pour obtenir une véritable cristallisation totale, j'ai fait les expériences suivantes : comme cela a été dit plus haut, en même temps qu'un aquarium témoin, c'est-à-dire contenant de la vase noire et de l'eau de mer glucosée, j'ai mis en culture un aquarium identique, mais recouvert d'une couche d'huile de vaseline, et un autre aquarium identique, mais dans lequel barbotait de l'air comprimé.

Le premier aquarium a suivi son développement normal, le deuxième a donné les mêmes phénomènes que le premier, quant à l'attaque des sulfates avec dégagement d'hydrogène sulfuré. Toutefois, je n'ai pas obtenu, sous l'huile de vaseline, de voile de carbonates important, mais seulement quelques lambeaux de voile développés très tardivement. Il semble qu'on puisse affirmer, dans ce cas, que l'huile de vaseline a partiellement empêché la diffusion du CO_2 et qu'on est toujours resté dans des conditions de sursaturation, le Ca et le Mg restant à l'état de bicarbonates en solution.

Dans l'aquarium où barbotait de l'air comprimé, les phénomènes ne sont pas aussi évidents, car il est nécessaire que la solution soit calme pour avoir la formation d'un beau voile de carbonates; toutefois, on a pu noter qu'alors qu'on n'avait pas encore de formation de voile dans le premier aquarium, on avait déjà un dépôt blanc de carbonates se faisant sur les parois de l'aquarium aéré. Par conséquent, l'aération et la turbulence permettent au CO_2 en excès de se dégager plus rapidement, d'où formation plus rapide des carbonates.

Dans les expériences sur les diverses quantités de glucose nécessaires pour le développement du phénomène, on a vu que de grandes quantités de glucose, si elles ralentissaient le début du phénomène, ne l'empêchaient pas d'être complet, alors que des quantités insuffisantes ne donnaient que des formations de voile incomplet; il semble donc là qu'on se trouve en présence du phénomène inverse, à savoir qu'il n'y a pas eu assez de CO_2 dégagé.

Les expériences sur les températures croissantes viennent en partie confirmer ces choses; en partie seulement, car, dans ce cas, intervient aussi la survie des bactéries sulfato-réductrices à certaines températures. Cependant, la très grande rapidité de forma-

tion du voile, coïncide avec le fait que le dégagement gazeux se fait beaucoup plus rapidement à ces températures. Le voile, une fois écumé, se reforme beaucoup plus rapidement que dans les expériences laissées à la température du laboratoire.

Dans plusieurs cas de culture, j'ai mis deux aquariums identiques, mais dans l'un je retirais le voile dès qu'il était formé suffisamment, alors que je laissais l'autre sans le toucher. Les résultats de la productivité en carbonates sont donnés dans le graphique suivant (fig. 20).

On peut voir que le voile du deuxième aquarium met beaucoup plus de temps à ter-

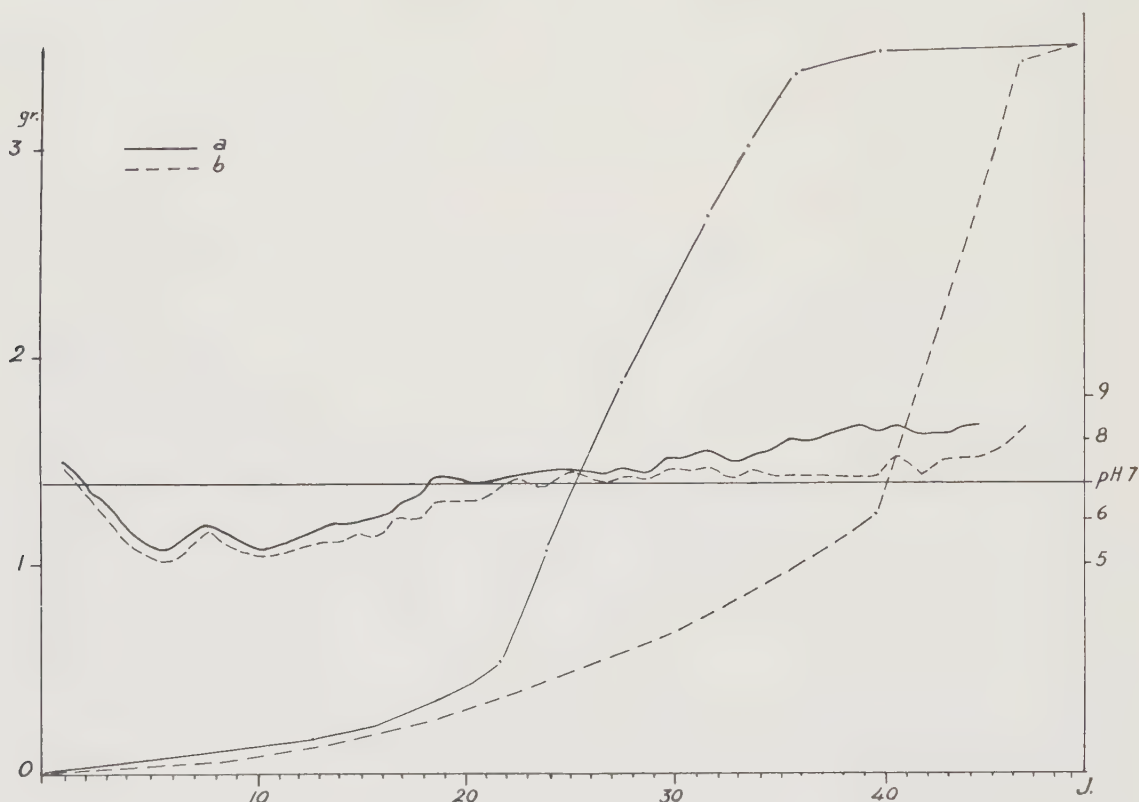


FIG. 20. — Courbes montrant le ralentissement de la formation des carbonates lorsqu'on « n'écume » pas la surface de la culture au fur et à mesure des cristallisations (a, aquarium I « écumé » régulièrement; b, aquarium II, 1^{er} voile retiré le quarantième jour).

miner sa cristallisation que le premier. En fait, lorsque le premier aquarium a terminé sa cristallisation, j'ai retiré le voile du deuxième; alors qu'on obtenait près de 3,5 g de carbonates dans le premier aquarium, le voile formé à ce moment là dans le deuxième ne pesait que 1,2 g; le voile a continué à se former ensuite pour atteindre, lui aussi, une valeur voisine de 3,5 g. Ceci prouve que, lorsque le voile est bien formé et couvre d'une façon continue la surface de la culture, il joue le même rôle que l'huile de vaseline dans les expériences précédentes : il empêche le départ du CO_2 en excès, et, par là même, la formation du voile. Ceci est confirmé par les mesures du pH, qui restent inférieures dans l'aquarium II à celles de l'aquarium I tant que le voile n'a pas été retiré.

4. — Effets de la stérilisation.

Afin de déterminer l'origine bactériologique et non chimique du phénomène de précipitation des carbonates dans les vases, et de déterminer quelle était la partie la plus active du complexe vase/eau de mer, j'ai procédé aux expériences suivantes :

Une série d'erlenmeyers (1 à 4) contenaient de la vase noire stérile et de l'eau de mer glucosée stérile (série I).

Une série d'erlenmeyers (9 à 12) contenaient de la vase noire stérile et de l'eau de mer glucosée (série II).

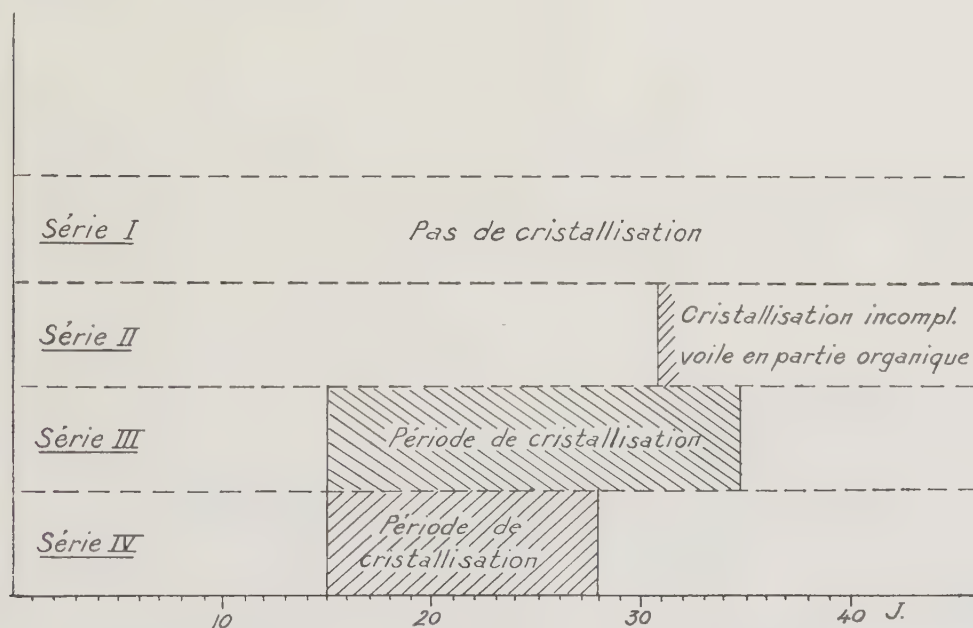


FIG. 21. — Influence de la stérilisation sur la formation du voile.

Série I, vase stérile, eau de mer glucosée stérile.
 Série II, vase stérile, eau de mer glucosée.
 Série III, vase, eau de mer glucosée stérile.
 Série IV, vase, eau de mer glucosée.

Une série d'erlenmeyers (17 à 20) contenaient de la vase noire non stérile et de l'eau de mer glucosée stérile (série III).

Une série d'erlenmeyers (25 à 28) contenaient de la vase noire non stérile et de l'eau de mer glucosée non stérile (série IV, témoin).

La série IV a donné un début de formation de carbonates dès le 15^e jour et la cristallisation était terminée le 28^e jour.

La série III a donné aussi un début de cristallisation le 15^e jour, mais, comme le montrent le tableau (fig. 21) et les courbes (fig. 22), ce n'est que le 35^e jour que l'on a eu la fin de cristallisation; cette cristallisation est complète.

La série II a commencé par nous donner des voiles très chargés en hydroxyde de fer et en matière organique, nous n'avons pu obtenir de voile réellement entièrement cristallin, ils étaient toujours blancs et mous; cependant, à partir du 31^e jour, on obtient une légère effervescence à l'acide chlorhydrique.

Dans la série I, il ne s'est jamais formé de carbonates; dans un des erlenmeyers se sont développées quelques moisissures dues à une stérilisation incomplète, mais les autres sont restés intacts.

On peut donc conclure à une origine bactériologique du phénomène. Il semble que les bactéries qui en sont responsables se trouvent en beaucoup plus grande abondance dans

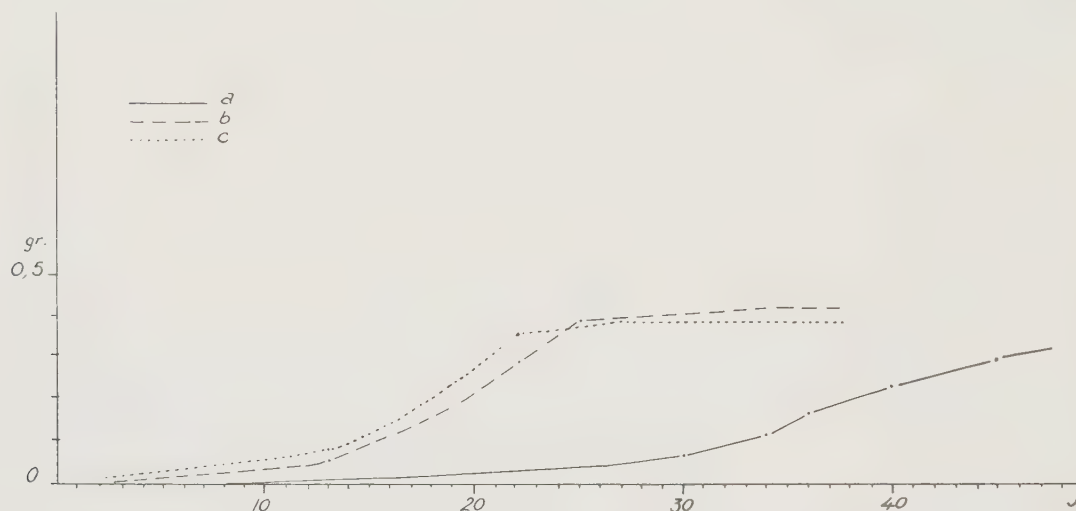


FIG. 22. — « Productivité » en carbonates, en fonction de la stérilisation.

a, série II, vase stérile, eau de mer glucosée.
b, série III, vase, eau de mer glucosée stérile.
c, série IV, vase, eau de mer glucosée.

la vase que dans l'eau de mer, étant donné le grand retard constaté dans tous les phénomènes de la série II par rapport à la série III et, à plus forte raison, par rapport à la série IV. D'autre part, la stérilisation de l'eau de mer ne retarde que très peu le phénomène.

Le tableau des courbes de productivité en carbonates contient une courbe moyenne pour chaque série. Ces courbes sont les courbes réelles, étant donné que toutes les expériences ont été faites avec la même quantité d'eau de mer, et que la quantité finale de voile ne varie qu'en raison des conditions différentes de stérilisation.

5. — Etude de sédiments d'origines diverses.

Pour clore cette étude de la précipitation expérimentale des carbonates par les vases, il m'a semblé intéressant de voir si d'autres vases que la vase noire de la baie de Villefranche avaient le pouvoir de former des carbonates lorsqu'elles étaient enrichies en

matière organique facilement assimilable. J'ai donc procédé à des expériences parallèles à celles faites précédemment, en utilisant, d'une part, les vases gris beige de la baie de Villefranche, et, d'autre part, des vases en provenance de La Rochelle (Charente-Maritime).

a) ETUDE DES VASES GRIS BEIGE DE VILLEFRANCHE. — Presque toutes les expériences précédentes ont été faites en même temps sur des vases beiges.

Le phénomène général en gros reste le même. Si l'on étudie de près les courbes données au graphique (fig. 23), on peut noter :

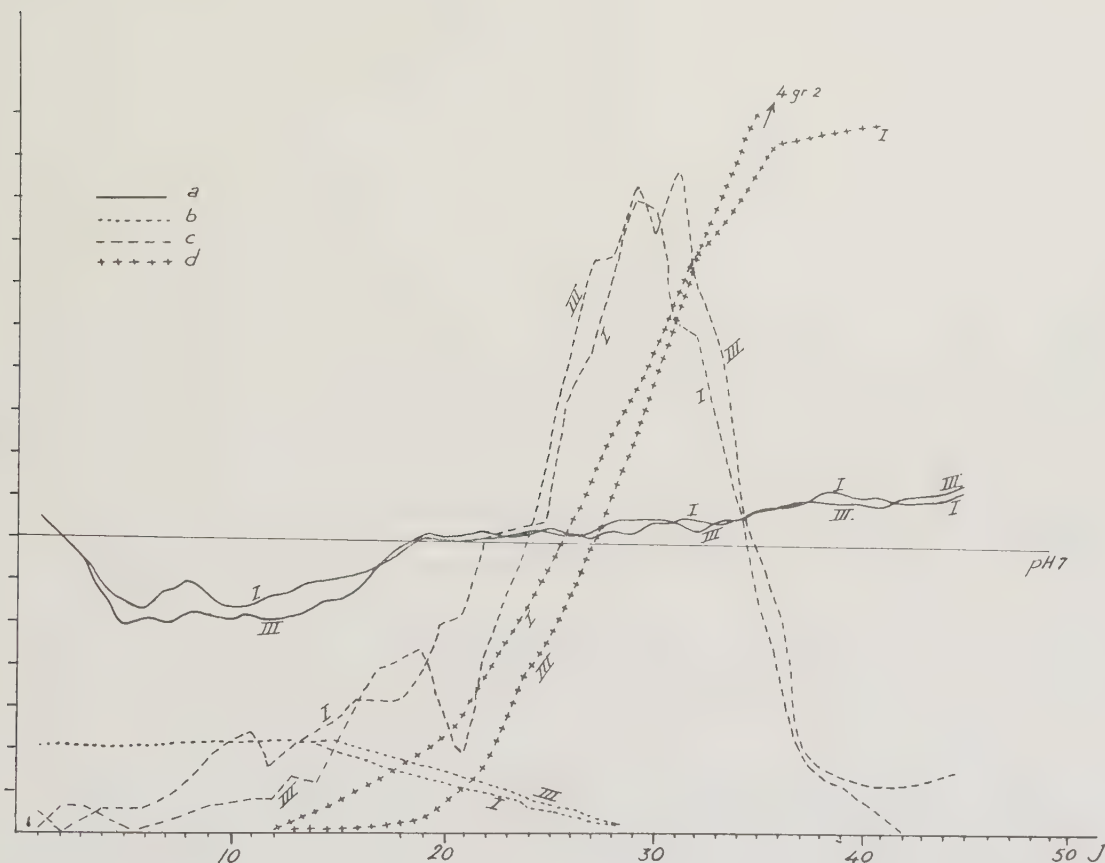


FIG. 23. — Variations observées au cours des cultures de vase noire (aquarium I) et de vases beiges (aquarium III).

En abscisses : 1 division = 1 unité pH (a) ; = 0,1 g SO_4 (b) ; = 0,02 g S (c) ; = 0,2 g carbonates (d).

1° Pour les variations de pH : l'aquarium I qui contient de la vase noire a, au départ, un pH plus élevé que l'aquarium III qui contient la vase beige; ils ne tardent pas à se rejoindre pour suivre ensuite les mêmes variations.

2° Pour les variations du SO_4 : on note, là aussi, un léger retard dans la décomposition des sulfates dans l'aquarium de vase beige (III).

3° Pour l'hydrogène sulfuré : la variation est dans le même sens, après un léger retard de l'aquarium III, les deux courbes se rejoignent et ont pratiquement les mêmes valeurs.

4° Les courbes de productivité de carbonates ont, en gros, la même allure; on retrouve, là encore, le léger retard de l'aquarium III, puisque ce n'est que le 19^e jour que débute la formation du voile, alors que c'est le 15^e jour qu'on a pu récolter le premier voile dans l'aquarium I.

Le fait que l'aquarium III donne finalement une valeur plus grande pour les carbonates, vient du fait que, comme nous l'avons déjà dit, les premiers voiles ne sont pas purs

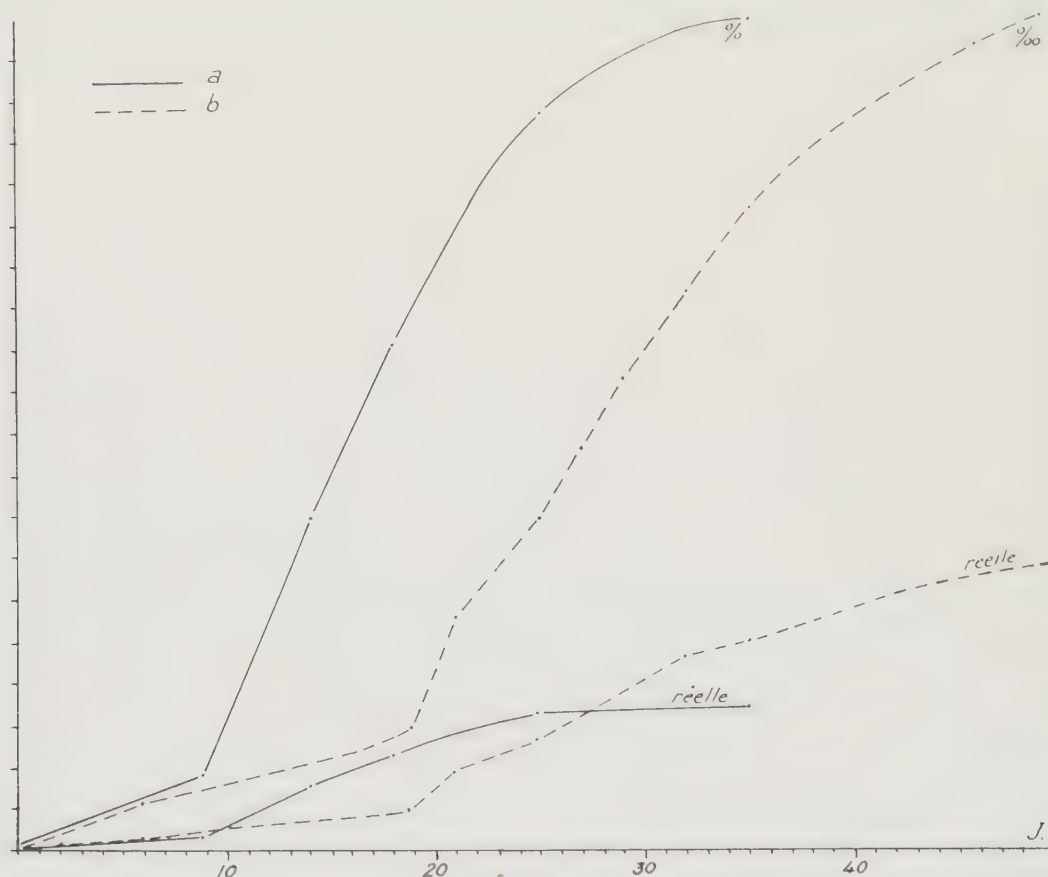


FIG. 24. — Comparaison entre les quantités de carbonates formées à partir de vase noire de Villefranche et de vase de La Rochelle. Courbes cumulatives réelles et recalculées en %.

En abscisse : une division = 5 % de carbonates ou 0,2 g. a, La Rochelle; b, Villefranche.

et contiennent des quantités variables de fer et de matière organique; or, dans cet aquarium, ce n'est qu'au quatrième voile qu'on a obtenu un voile de carbonates purs, alors que dans l'aquarium I, dès le deuxième voile, on pouvait considérer que le fer était absent.

Il semble donc que la seule différence existant entre le comportement des vases beiges et des vases noires de Villefranche soit dans la rapidité de début de formation du voile, ce qui s'expliquerait par, à l'origine, une moins grande quantité de bactéries sulfato-réductrices. Celles-ci, mises ensuite dans des conditions favorables, semblent pouvoir se

développer de façon identique. Cette vase, comme on l'a vu au chapitre II, contient un peu moins de matière organique (dosage du carbone organique) que la vase noire du fond de la baie.

b) VASE DE LA ROCHELLE. — Il ne m'a pas été possible pour cette vase, en raison de la faible quantité d'eau de mer de La Rochelle que je possédais, de faire tous les dosages précédents, je n'ai par conséquent étudié le phénomène que du point de vue qualitatif et non quantitatif.

Dès le deuxième jour de culture, l'eau de mer surnageante, qui avait été glucosée, comme pour les cultures des vases de Villefranche à 0,5 %, s'est troublée. En même temps, on pouvait noter un fort dégagement gazeux qui a duré les six premiers jours, au bout desquels, de pH 7 au départ, on avait atteint le pH 5, mettant ainsi en évidence le même phénomène de décomposition du glucose que précédemment. Ce dégagement gazeux est d'ailleurs accompagné de l'odeur caractéristique de fermentation; dès la fin de ce phénomène, apparaît un voile rouille important. Une fois ce voile enlevé, on obtient, le 9^e jour, un début de voile blanc cristallin, exactement comme dans les cultures de Villefranche; de même, le pH atteint à ce moment une valeur à peu près stable, aux environs de 7. Ce voile s'est formé pendant une vingtaine de jours; au bout de ce temps, par récoltes successives, nous en avons obtenu 0,7 g pour 250 cm³ d'eau de mer. Si l'on compare cette productivité à celle de la baie de Villefranche, on constate qu'elle est à peu près équivalente; en effet, pour le bécier 0,5 utilisé lors des variations de concentrations en glucose on avait obtenu, pour 500 cm³ d'eau, une productivité de 1,36 g. L'eau de mer de La Rochelle contenant un peu moins de sulfates que celle de Villefranche, on doit, là encore, faire intervenir, pour expliquer la valeur un peu trop forte trouvée pour La Rochelle, le fait que les premiers voiles sont nettement plus chargés en fer dans le cas des vases beiges que dans celui des vases noires.

Ces résultats sont résumés dans les courbes données figure 24.

Il est évidemment difficile de généraliser le phénomène à toutes les vases; cependant, les vases que j'ai utilisées sont assez dissemblables pour que l'on puisse envisager que le phénomène est assez étendu dans la nature, à condition que les bactéries aient à leur disposition suffisamment de matière organique assimilable.

A la fin de toutes ces expériences, les trois sortes de vase que l'on a pu récupérer au fond des aquariums de cultures étaient macroscopiquement identiques, les vases beiges étaient devenues aussi noires que la vase noire de Villefranche.

TROISIÈME PARTIE

Parmi les auteurs qui se sont occupés de la précipitation des carbonates dans les mers, bien peu se sont préoccupés des formes minéralogiques qu'on y rencontrait. Cependant, DREW (1910-1913) constate, en milieu synthétique, que si l'on introduit un grain de sable dans une culture en train de former du carbonate de calcium, on obtient autour de ce grain de sable une concrétion permettant de voir là le processus de formation des oolithes. BRUSSOF (1933) ne travaillant pas dans les mêmes conditions, puisqu'il s'agit là d'eaux de sources thermales à Aix-la-Chapelle, donne toutefois des résultats curieux : il obtient des sphérolithes qui, d'après lui, sont, à l'origine, formés par les bactéries orientées en formation rayonnante et sécrétant dans leur membrane du carbonate de calcium.

Dans l'ensemble, les formes cristallines du carbonate de calcium dans le milieu marin ont surtout été étudiées par les zoologistes, tels PRENANT (1927 à 1930), MANIGAULT (1939), TIXIER-DURIVAUT (1940), STOLKOWSKI (1951). Les résultats qu'ils ont obtenus, bien que devant être pris en considération, ne peuvent actuellement pas nous être d'une grande utilité, étant données les conditions très spéciales dans lesquelles le carbonate de calcium se forme dans les régénérations de coquilles.

Plus près de nous sont les travaux de RIVIÈRE (1939), repris par FAIRBRIDGE (1950), sur le mécanisme de dolomitisation des sédiments calcaires. Ils font une différence entre la dolomitisation des sables calcaires après le dépôt de ceux-ci par libre accès de l'eau de mer et dépôt du magnésium qu'elle contient dans les sédiments poreux, et la formation directe de certaines dolomies en milieu réducteur, ces dolomies étant souvent riches en matière organique.

I. — ÉTUDE AU MICROSCOPE DES DIFFÉRENTS VOILES

1. — Variation du voile au cours de sa formation.

Avant d'étudier l'action des différents modes de formation sur les formes cristallines, il m'a semblé intéressant d'étudier un voile au fur et à mesure de sa formation, dans le cas simple de la vase noire de Villefranche, dans de l'eau de mer glucosée.

Deux béciers identiques ont été mis en culture; ils contenaient la même quantité de vase noire, et la même quantité d'eau de mer glucosée à 0,5 %.

Dans le bécier 1, j'ai laissé le voile se former, en prélevant tous les jours une petite parcelle pour la monter en frottis et l'examiner au microscope; la surface de ce bécier n'était écumée que lorsque le voile semblait rester stationnaire.

Dans le bécier II, par contre, dès qu'il y avait la plus légère formation de voile, il était totalement retiré, une partie était montée en frottis et examinée au microscope.

Le tableau suivant résume les observations faites pendant la durée de ces expériences :

Date	Bécher 1	Bécher 2
29-6	Mis en culture.	Mis en culture.
30-6	Pas de voile.	Pas de voile.
31-6	Liquide clair, très léger voile opalescent.	Liquide très clair, très léger voile irisé.
2-7	Léger voile opalescent. Frottis 1100 : dans l'ensemble cristallin, mais cristallisation très fine, sans formes bien définies. Quelques individus ronds, mais polarisant très peu. Le tout teinté de fer.	Même léger voile.
3-7	Frottis 1101. Plages microcristallines, mêmes éléments ronds entourés d'une couronne microcristalline. Fer. Diatomées.	Frottis 1102. Très petites plages microcristallines. Abondance de fer.
4-7	Frottis 1103. Fer. Assez nombreux microcristaux, nombreuses diatomées.	Frottis 1104. Très ferrugineux, nombreuses diatomées, moins cristallin que 1103.
5-7	Frottis 1105. Toujours grande quantité de fer. Cristaux isolés plus gros, toujours présence d'éléments arrondis polarisant très peu.	Frottis 1106. Ferrugineux, débris végétaux. Microcristaux.
6-7	Très léger voile, liquide noirci. Frottis 1107. Ferrugineux. Microcristallin.	Très léger voile, liquide noirci. Frottis 1108. Ferrugineux. Microcristallin.
7-7	Voile commence à devenir important. Liquide presque noir. Frottis 1109. Très cristallin, microcristaux en plages bien individualisées. Éléments ronds entourés d'une plage concentrique de microcristallisation. Fer. Diatomées.	Très léger voile non cohérent, liquide presque noir. Frottis 1110. Microcristaux. Fer.
8-7	Frottis 1111. Id. à 1109, les plages de microcristallisation ne sont pas très compactes.	Frottis 1112. Id. à 1111. Très léger voile, <i>écumé</i> .
9-7	Complètement noir, forte odeur H ₂ S, voile assez important. Frottis 1113. Très bien cristallisé, petits cristaux à peu près identiques, d'environ 0,008 mm.	Id. au bécher 1, voile se reforme. Frottis 1114. Bien cristallisé, moins dense que 1113.
10-7	Liquide s'éclaircit, voile important, pas encore cohérent. Frottis 1115. Beaux cristaux plus gros que dans le frottis précédent, pas encore cohérents, assez nombreux cristaux séparés à formes rhomboédriques.	Id., léger voile, <i>écumé</i> . Frottis 1116. Beaux cristaux pas cohérents, très belles formes cristallines.
11-7	Voile assez important pas épais. Frottis 1117. La cristallisation devient plus serrée, rares cristaux isolés.	Voile se reforme, <i>écumé</i> . Frottis 1118. Très beaux cristaux isolés, beaux rhomboèdres. Plages cristallines cohérentes.

Date	Bécher 1	Bécher 2
12-7	Voile commence à être cohérent. Frottis 1119. Microcristallisation très dense; sur les bords s'individualisent des cristaux assez grands à relativement belles formes cristallines.	Voile en fleurs de neige, <i>écumé</i> . Frottis 1120. Très beaux sphérolithes bien individualisés, à belles croix noires. Encore des zones de gros cristaux, quelques zones microcristallines. Sphérolithes pouvant atteindre 0,07 mm.
13-7	Voile important. Frottis 1121. Gros cristaux de cristallisation confuse, sur les bords des plages, tendance à la sphérolithisation.	Voile important en fleurs de neige, <i>écumé</i> . Frottis 1122. Zones de microcristallisation d'où s'individualisent des sphérolithes.
14-7	Voile très important, cassant. Frottis 1123. Très confus et épais, mais tendance à la sphérolithisation.	Fleurs de neige très espacées, <i>écumé</i> . Frottis 1124. Très beaux sphérolithes coalescents sortant de plages microcristallines.
15-7	Voile très important, cassant. Frottis 1125. Sphérolithes coalescents et zones de gros cristaux.	Voile en fleurs de neige, <i>écumé</i> . Frottis 1126. Très beaux sphérolithes coalescents sortant de plages microcristallines.
16-7	Voile très épais. Frottis 1127. Plages microcristallines, gros sphérolithes entourés d'une cristallisation secondaire de cristaux bien formés; les sphérolithes présentent de belles zones d'accroissement.	Fleurs de neige moins importantes, <i>non écumé</i> . Frottis 1128. Même aspect que 1127, mais les sphérolithes sont moins gros.
17-7	Voile très épais. Frottis 1129. Zones opaques cimentées par de beaux cristaux hyalins, quelques zones de microcristallisation.	Voile cohérent, mais encore en forme de fleurs de neige, <i>écumé</i> . Frottis 1130. Sphérolithes coalescents, structure polygonale. Pratiquement, pas de cristaux.
18-7	Frottis 1131. Mélange très confus des trois cristallisations, mais peu de sphérolithes, surtout microcristallisation.	Frottis 1132. Très jolis cristaux bien individualisés, tendance au groupement en rosette, quelques morceaux de sphérolithes, 1 ou 2 sphérolithes bien formés.
19-7	Voile toujours très épais. Frottis 1133. Toujours même cristallisation confuse.	Voile cohérent, mais en fleurs de neige, <i>écumé</i> . Frottis 1134. Plages de microcristallisation à structure fibreuse sur les bords. Rares sphérolithes bien individualisés, quelques beaux sphérolithes sur les bords de la masse cristalline.
20-7	Frottis 1135. Toujours mélange des 3 cristallisations, assez nombreux sphérolithes coalescents.	Très faible voile, <i>écumé</i> . Frottis 1136. Petits cristaux, tendance à la structure fibreuse.
21-7	Voile très épais. Frottis 1137. Id. à 1135.	Petites fleurs de neige, peu denses sur toute la surface, <i>écumé</i> . Frottis 1138. Petits cristaux bien formés. Quelques éléments fibreux, mais pas de sphérolithes caractéristiques.

Date	Bécher 1	Bécher 2
22-7	<i>Enlevé le voile.</i> Frottis 1139. Toujours très confus. Sphérolithes jaunes polarisant peu et ne donnant plus de croix noires, nettes dans des plages de microcristallisation. Quelques beaux cristaux.	Très faible cristallisation, <i>écumé</i>. Frottis 1140. Très fine cristallisation non cohérente. Une zone entièrement sphérolithique coalescente, mais très petits sphérolithes hyalins.
23-7	Cristallisation importante en fleurs de neige. Frottis 1141. Uniquement très petits sphérolithes coalescents en dendrites.	Très faible cristallisation. Frottis 1142. Très fine cristallisation, pas de sphérolithes bien définis; zone à tendance fibreuse. Très fine cristallisation autour d'une fibre végétale.
24-7	Frottis 1143. Beaux sphérolithes coalescents.	<i>Ecumé.</i> Frottis 1144. Finement cristallisé, tendance à la sphérolithisation sur les bords.
25-7	Frottis 1145. Très beaux sphérolithes coalescents, probablement de deux générations, les uns plus clairs.	<i>Ecumé.</i> Frottis 1146. Microcristallisation sphérolithes sur les bords.
26-7	Le voile ne semble pas devenir plus important. <i>Ecumé.</i> Frottis 1147. Très beaux sphérolithes coalescents, zones de microcristallisation secondaire. Structure polygonale.	<i>Plus de voile.</i>
27-7	Voile en fleurs de neige. Frottis 1148. Beaux sphérolithes coalescents ou libres. Cristallisation secondaire plus dense de petits cristaux.	
28-7	Voile assez important. Frottis 1149. Très gros sphérolithes jaunes coalescents, avec cristallisation secondaire de petits sphérolithes clairs. Quelques plages de cristallisation secondaire par rapport à ces petits sphérolithes clairs.	
29-7	Frottis 1150. Sphérolithes coalescents très fibreux, belles zones d'accroissement, ciment secondaire de petits cristaux. Structure polygonale.	Devient rose.
30-7	<i>Ecumé.</i> Frottis 1151. Très beaux sphérolithes coalescents, belles zones d'accroissement. Structure polygonale, quelques zones de microcristallisation.	
31-7	Terminé.	

Comme on le voit d'après le tableau précédent et d'après les planches de photos en fin de mémoire, le voile subit une évolution pendant sa formation. Les premiers voiles confirment l'hypothèse, émise précédemment, concernant la migration du fer dans l'eau de mer pendant les premiers jours de la réaction. Le voile de carbonates pendant cette période se forme très lentement; les formes cristallines sont très fines et mal individualisées; puis, si on laisse le voile se former sans le toucher, les cristaux deviennent de plus en plus gros, montrant des formes cristallines beaucoup plus précises, presque toutes rhomboédriques. Puis, petit à petit s'introduit une sphérolithisation que l'on remarque d'abord sur les bords des plages cristallines, puis peu à peu l'ensemble est envahi par les formations de sphérolithes coalescents, et, finalement, ces sphérolithes n'ayant plus la place de se développer, leurs bords, collés les uns aux autres, s'aplanissent et donnent de très belles structures polygonales. Ces sphérolithes, qui au début de leur cristallisation sont hyalins, polarisant très bien la lumière, et donnant de très belles croix noires, deviennent petit à petit opaques en lumière parallèle; ils polarisent beaucoup moins bien, et sont entourés de zones de croissances concentriques hyalines, qui elles-mêmes deviendront plus opaques au fur et à mesure de la cristallisation.

Par contre, si l'on écume le voile après chaque formation un peu importante, on obtient plus rapidement des sphérolithes, mais ceux-ci n'ont jamais le temps d'évoluer suffisamment pour présenter d'aussi belles formes d'accroissement que dans le cas précédent. Dans ces conditions, on s'aperçoit que si le début de cristallisation est assez lent, par contre, une fois le phénomène démarré, on obtient en vingt-quatre heures de très belles formes cristallines.

Des mesures de pH faites sur ces deux béciers ont montré que la première cristallisation commençait lorsque le pH se trouvait aux alentours de 6,5, et que la cristallisation en sphérolithes ou en gros cristaux n'apparaissait que pour des pH voisins de 7; ces valeurs sont plus vite atteintes dans le bécier 2 où l'aération est meilleure.

Dans les paragraphes qui vont suivre, ayant pour sujet les formes cristallines rencontrées dans les voiles, suivant les conditions de formation de ces voiles, nous nous bornerons à l'indication des trois formes cristallines rencontrées au cours de l'expérience précédente : microcristallisation, cristaux bien formés et sphérolithes.

2. — Variation des voiles en fonction des différents modes de productivité.

Nous allons rapidement passer en revue les résultats des examens microscopiques des voiles recueillis au cours des expériences indiquées au chapitre précédent.

a) LUMIÈRE. — Dans l'aquarium I laissé à la lumière du jour, on a pu recueillir 10 voiles successifs :

Le premier voile recueilli, après treize jours de culture, s'est montré très ferrugineux, il ne présente pas de cristaux de carbonates très définis.

Le deuxième, après vingt-deux jours de culture, présente encore quelques traces ferrugineuses, mais surtout de très nombreux sphérolithes coalescents à nettes zones d'accroissement concentriques, et quelques plages entièrement formées de petits cristaux entre lesquels on retrouve du dépôt de fer.

Le troisième, après vingt-quatre jours de culture, montre de très grandes plages bien

crystallisées avec, sur les bords, de très beaux sphérolithes à croix noires et zones d'accroissement, enrobés dans une plage de microcristallisation secondaire.

Le quatrième, après vingt-six jours de culture, présente de très beaux sphérolithes coalescents donnant une structure polygonale, les sphérolithes sont transparents et à belles zones de croissance.

Le cinquième, après vingt-huit jours de culture, montre de grandes plages de microcristallisation dans lesquelles s'individualisent de petits sphérolithes. Quelques zones de petits sphérolithes coalescents.

Le sixième, après trente jours de culture, est formé de sphérolithes coalescents à structure polygonale, et quelques zones de petits cristaux à tendance sphérolithique.

Dans le septième voile, après trente-deux jours de culture, on trouve de très beaux sphérolithes à zones de croissance, ils sont légèrement jaune opaque et cimentés par une deuxième cristallisation de petits sphérolithes hyalins. Quelques plages semblent microcristallines, mais s'organisent en beaux sphérolithes vers l'extérieur.

Le huitième voile, après trente-quatre jours de culture, présente deux générations de sphérolithes coalescents, les plus clairs cimentant des masses de sphérolithes plus opaques. La structure d'ensemble est polygonale; les sphérolithes ne se forment bien que sur les bords libres. Il ne semble pas y avoir de cristaux.

Le neuvième voile, après trente-six jours de culture, est formé de sphérolithes coalescents de deux générations, et de zones de cristallisation confuse dont les bords s'organisent en sphérolithes.

Le dernier voile, recueilli après quarante jours de culture, présente des zones sphérolithiques opaques entourées d'une zone d'accroissement hyaline. On y trouve aussi des sphérolithes de deuxième génération, hyalins, coalescents. Le tout dans un ciment microcristallin.

L'examen des six voiles recueillis dans l'aquarium II conservé en lumière continue montre des figures identiques à celles des voiles de l'aquarium I.

Dans l'aquarium VII conservé dans le noir, on n'a pu recueillir que trois voiles, mais ils sont assez différents des précédents :

Le premier voile, après vingt et un jours de culture, est ocre, il ne fait que très faiblement effervescence à l'acide chlorhydrique et on n'y trouve que de très rares microcristaux.

Le deuxième voile, après vingt-huit jours de culture, présente de beaux sphérolithes coalescents; ces sphérolithes, dans l'ensemble, sont beaucoup plus gros que les précédents; un sphérolithe isolé mesurait 0,2 mm. Il reste dans ce voile beaucoup de fer.

Le dernier voile présente quelques rares sphérolithes, plus gros que les précédents (pouvant atteindre 0,4 mm, mais très sales).

De ces résultats, on peut conclure que l'absence de lumière, si elle gêne la formation quantitative des carbonates, en ralentissant cette cristallisation, permet d'obtenir des individus beaucoup mieux développés.

b) TEMPÉRATURE. — Les résultats des examens microscopiques des voiles obtenus dans les cultures à différentes températures sont résumés dans le tableau 25.

On voit clairement que si les cristallisations se forment plus rapidement dans les béciers soumis aux plus hautes températures, elles sont de moins en moins complètes.

Les formes cristallines, qui sont normales dans les béciers 1 et 1', respectivement à 20 et 30°, présentant au début une microcristallisation, pour passer, dans les voiles sui-

vants, à des gros cristaux bien individualisés et finalement à de beaux sphérolithes, deviennent de moins en moins belles avec l'élévation de la température. En effet, si dans le bécher 2, à 40°, on obtient encore quelques beaux sphérolithes, on n'en trouve pratiquement plus dans les cultures à 50, 60 et 70°. Dans ces cultures à températures élevées, on rencontre surtout des voiles microcristallins, très chargés en fer. Macroscopiquement, d'ailleurs, ils ne se présentent pas de la même façon; on n'a jamais obtenu de très beaux voiles blancs, mais toujours des plaquettes ocre, très cohérentes, comme si la surface de la culture s'était prise en masse, et non pas lentement comme dans les autres cas.

Le voile unique, qui s'était formé à 70° sans addition de glucose, s'est montré formé par une très fine microcristallisation; il était ocre foncé, mais ne donnait aucune réaction au sulfocyanure de potassium. Il semble qu'on puisse envisager qu'à ces températures le voile est coloré en ocre, non pas par le fer comme dans les autres cas, mais par une partie des matières humiques de la vase qui se dissolvent dans l'eau chaude. Dans toutes ces cultures, en effet, dès le troisième ou le quatrième jour, le liquide devient jaune, pour virer ensuite au marron foncé.

Donc, du point de vue des formes cristallines, les trop fortes températures, en accélérant la vitesse de formation des voiles, gênent le développement de belles formes cristallines.

c) CONCENTRATION EN GLUCOSE. — Comme il a été vu dans la partie précédente, la concentration en glucose a une influence sur la rapidité de développement du voile de carbonates.

J'ai pu recueillir les voiles successifs de cultures contenant de 0,1 à 3 % de glucose, et les premiers voiles des cultures à 4 et 5 %; étant donnée la lenteur d'évolution aux concentrations supérieures, il ne m'a pas été possible de recueillir leurs voiles.

Le tableau suivant (fig. 26) résume les différentes formations que j'ai rencontrées, étant bien entendu que ce tableau est simplifié, et que c'est la forme qui se présente en majorité qui est signalée.

En étudiant ce tableau, on voit que, jusqu'à 2 % de glucose, tous les voiles commencent par une microcristallisation, qui est d'ailleurs toujours accompagnée par un voile de fer. Jusqu'à 0,4 % de glucose, cette cristallisation est immédiatement suivie d'une cristallisation en sphérolithes, d'abord isolés, ou s'individualisant de zones de microcristallisation, spécialement sur les bords de ces plages.

Petit à petit, il ne se forme plus que des sphérolithes coalescents, donnant une structure polygonale. A partir de 0,5 % de glucose, et jusqu'à 1 %, entre la période de microcristallisation et celle de sphérolithisation, existe une période où se forment essentiellement des gros cristaux bien formés, donnant parfois des images de rhomboèdres parfaits; puis, très rapidement, le voile n'est plus formé que de sphérolithes. Ceci, jusqu'au dernier voile recueilli.

Les voiles formés dans les cultures à 2 et 3 % de glucose ont pu aussi être recueillis jusqu'à la fin de la cristallisation; ils montrent un changement dans l'évolution de ce voile. Le début de la cristallisation à 2 % se fait, comme précédemment, par une microcristallisation, suivie de la formation d'un mélange de sphérolithes et de microcristallisation, mais au lieu de ne plus trouver dans les derniers voiles que des sphérolithes, ceux-ci ne se forment plus, et on retrouve, en fin de cristallisation, des cristaux assez gros et bien formés.

Les voiles de la culture à 4 % accusent encore ce phénomène, en ce sens qu'il n'y a

pratiquement plus de microcristallisation; on obtient tout de suite des sphérolithes, puis un mélange de cristaux et de sphérolithes, pour trouver finalement, comme dans le cas précédent, uniquement des gros cristaux. Pour les concentrations en glucose supérieures, nous n'avons pu examiner que les premiers voiles; mais ceux-ci semblent avoir la même évolution: d'abord des sphérolithes, parfois mélangés à des cristaux, puis, assez rapidement, on ne trouve plus de sphérolithes, mais seulement des cristaux.

Il semble donc qu'en influençant la rapidité de formation du voile, la concentration en glucose influence les formes cristallines.

d) MATIÈRES ORGANIQUES DIVERSES. — Nous avons vu précédemment que toutes les substances carbonées sont capables, en facilitant le développement bactérien, et en dégageant dans le milieu du CO_2 , d'activer la formation de voiles de carbonates. Le phénomène étant identique avec presque toutes les substances essayées, il était logique de prévoir une identité dans les formes cristallines obtenues.

Comme dans les autres cas, j'ai examiné au microscope tous les voiles successifs formés au cours des expériences; les résultats sont résumés dans le tableau suivant (fig. 27).

Pour tous les béchers de b5 à b18, la cristallisation suit, en gros, les règles généralement trouvées, à savoir: un début de cristallisation à formes microcristallines, suivi d'une cristallisation tendant vers la sphérolithisation, soit à partir de plages microcristallines dont les bords libres se sphérolithisent, soit par un arrangement des cristaux en rosette, donnant des formes pseudo-sphérolithiques. Les voiles suivants présentent une sphérolithisation parfaite; les sphérolithes sont coalescents et sont parfois tellement groupés les uns contre les autres qu'ils donnent des structures polygonales; les derniers voiles sont ensuite formés par une cristallisation beaucoup plus confuse, où se mêlent les trois formes de cristallisation: microcristallisation, beaux cristaux individualisés et de rares sphérolithes. Le bécher 19, qui avait été enrichi avec de la dextrine, et qui n'avait donné que 0,3 g de carbonates au lieu de 0,5 g comme tous les autres, présente des formes cristallines beaucoup plus confuses et moins bien formées, comme chaque fois que la cristallisation ne se fait pas dans les meilleures conditions.

C'est d'ailleurs ce que l'on retrouve si l'on examine le tableau (fig. 28) donnant les formes cristallines rencontrées dans les rares voiles formés dans les béchers 1 à 5, qui avaient été enrichis avec des substances azotées; seul l'enrichissement avec de l'asparagine ou avec le glyocolle présente des sphérolithes, ceux-ci n'atteignant jamais la densité observée dans les voiles précédents, et étant toujours accompagnés par une microcristallisation plus ou moins importante.

Le voile obtenu dans le cas de la peptone est très peu cristallin, il est surtout composé de dépôt de fer dans lequel, en lumière polarisée, on trouve une très fine microcristallisation.

e) ADDITION DE SULFATES. — Comme on l'a vu dans la partie précédente de ce travail, l'addition de sulfates divers n'influence la quantité de voile formé que si l'on ajoute une source carbonée en quantité suffisante.

C'est pourquoi je n'examinerai ici que les voiles formés dans les meilleures conditions, à savoir: avec des concentrations de glucose proportionnelles aux concentrations en sulfates.

Microcr. Fer.	Sphérol. coalescents. Nomb. grains opaques.	Sphér. 2 génér.	Mélange 3 crist.	b19 Dextrose.
Microcr. Fer.	Micro. don- nant sphér. Cristaux.	Sphér. coal.	Mic. don- nant sph. Vieux sph.	b18 Lactose.
Microcr. cristaux.	Sph. sortant de micro. Cr. fibreux.	Sphér. coal.	Sphér. 2 génér.	b17 Maltose.
Microcr. et cristaux.	Sphér. coal.	Sphér. 2 gén. Crist.	Sphér. 2 génér.	b16 Saccharose.
Microcr. Fer.	Microcr. donnant sphérol.	Sphér. 2 génér. Cristaux.	Confus. Sph. 2 gén. Cristaux.	b15 Rhamnose.
Microcr. à globules. Traces de fer.	Cristal. mélang. confuse.	Sphér. et crist.	Sphér. 2 génér.	b14 Arabinose.
Microcr. et gros cristaux.	Microcrist. tendance à sph.	Sphér. microcr. Crist.	Sphér. 2 génér.	b13 Xylose.
Microcr. et cristaux.	Zones de micr. donnant sphér. Gros cristaux.	Sphér. de 2 génér.	Sphér. de 2 génér.	b12 Galactose.
Microcrist. Quelques crist. Traces de fer.	Zones microcr. donnant sphér.	Sphér. 2 génér. Crist.	Sphér. de 2 génér.	b11 Mannose.
Microcrist. Quelques crist. Traces de fer.	Sphér. coal.	Crist. et sphér.	Sphér. 2 génér. et beaux cristaux.	b10 Levulose.
Microcrist.	Sphér. coal. Traces de micro.	Sphér. coal.	Sphér. 2 génér.	b9 Glucose.
Microcrist.	Sphér. coalesc. Struct. polyg.	Sph. Coal.	Sphér. coal.	b8 Dulcité.
Microcrist.	Sphér. coal. Microcr.	Crist. Micro. Sphér.	Mélange des 3 formes	b7 Sorbite.
Cristaux.	Sphér. coal. sortant de microcrist.	Sph. coal. Sph. sec. hyalins.	Sphér. coal. Sph. second. hyalins.	b6 Mannite.
Microcrist. Un peu de fer.	Gros crist. Rares sph.	Microc. Sph. coal.	Sphér. coal.	b5 Inosite.
				Jours de culture.

Fig. 27. — Variation des formes cristallines observées dans les voiles successifs de cultures utilisant des matières carbonées diverses.

Fig. 28. — Variation des formes cristallines observées dans les voiles successifs de cultures enrichies avec des substances azotées.

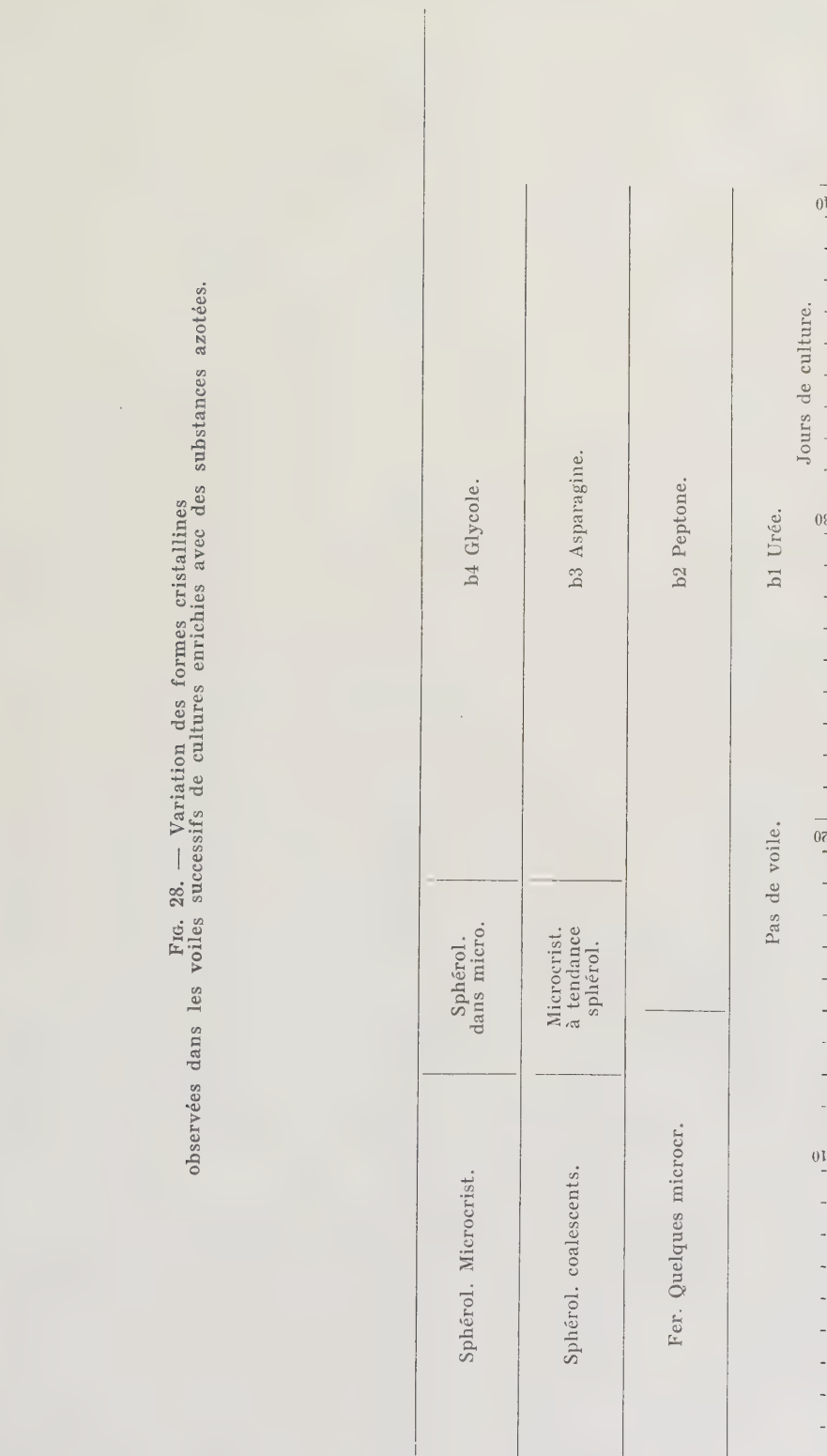


FIG. 29. — Variations des formes cristallines observées dans les voiles successifs de cultures additionnées de sulfates. (B1, vase + eau de mer glucosée 0,5 %; B9, vase + eau de mer glucosée 1 % + sulfate de magnésium; B11, vase + eau de mer glucosée 1 % + sulfate de fer.)

Fig. 29. — Variations des formes cristallines observées dans les voiles successifs de cultures additionnées de sulfates. (B1, vase + eau de mer glucosée 0,5 %; B9, vase + eau de mer glucosée 1 % + sulfate de magnésium; B11, vase + eau de mer glucosée 1 % + sulfate de fer.)											
B11	Fer.	Sphérolithes coalescents ponctués de noir.	Sph. coal. Qqs sph. noirs.	Sphérol. coalesc. ponctués de noir.	Sph. coal.	Sph. coal. ponc. noir.	Sphér. coal. et isolés. Crist. en rosette.	Quelques très gros sphérol. Sph. opaques. Fine crist. second.	« Vieux sphérol. » dans crist. hyaline secondaire.	Microcrist. Quelques sphérol. isolés.	
B9	Fer. Microcrist. Quelques beaux crist.	Sphér. coalesc.	Sph. 2 gén. Petits crist.	Sphér. coalesc. Microcr. → sphér.	Sph. coal. mal formé. Micro.	Sphér. Beaux crist. en rosette.	Sphérol. Cristaux.	Plages à bords sphér. Sphér. mal formés.	Mal crist. Plages à bord arrondi.	Microcrist.	
B1	Microcrist. et petits cristaux.	Sphérol Microcrist. → sphér.	Sphérol. Fine crist.	Sphérol.	Sphér. Belles zones de croiss.	Microcristallisation.					Jours de culture.

De telles cultures on été faites essentiellement avec addition de sulfate de magnésium et de sulfate de fer, tous deux facilement solubles dans l'eau de mer.

Etude des voiles formés avec addition de sulfate de Mg. — Si l'on compare les résultats (fig. 29) de l'examen microscopique des voiles successifs du bécber 1 et du bécber 9, on voit qu'il existe peu de différence. L'addition de sulfate de magnésium ne semble pas agir sur les formes cristallines. Les cristallisations étant seulement, entre le dixième et le trentième jour, plus denses dans le bécber 9 que dans le 1 (témoin).

Etude des voiles formés avec addition de sulfate de fer. — Toujours sur la figure 29, si l'on compare les résultats du bécber 1 et ceux du bécber 11, on remarque tout de même une petite différence. En premier lieu, le premier voile est presque entièrement formé de fer; dans le bécber 11, ce qui nous indique que ce fer est immédiatement transformé en hydroxyde de fer, pour plus tard être transformé en monosulfure de fer, il ne sera par conséquent pas libre pour donner des carbonates de fer. Ceci sera vérifié dans un chapitre ultérieur traitant de l'examen de quelques voiles aux rayons X.

On constate, d'autre part, que, dans presque tous les voiles recueillis, il existe, à l'intérieur des sphérolithes, des petits points opaques, noirs, ne polarisant pas la lumière. Les monosulfures de fer se trouvant en très grande abondance dans cette culture, on peut envisager que ces petites paillettes noires qui se trouvent disséminées dans le liquide peuvent, si elles sont en grande abondance, se trouver prises dans la cristallisation.

Il ne m'a pas été possible de pousser plus avant ces expériences, mais on peut se demander si, dans certaines conditions d'anaérobiose et de pression, ces monosulfures de fer ne pourraient pas se transformer en sulfures de fer (FeS_2) et nous donner l'explication de la présence fréquente de pyrites dans les sédiments calcaires.

f) MARAIS SALANTS. — Nous avons vu que les vases et l'eau des marais salants ne donnent pas de plus grandes quantités de carbonates que les vases marines et l'eau de mer. Les voiles ne sont pas caractéristiquement cristallins, ils sont blanchâtres et mous, et semblent plus organiques que minéraux.

L'examen microscopique confirme ces impressions. En effet, les voiles successifs formés dans un bécber contenant de la vase du salin des Pesquiers et de l'eau du salin glucosée ne montrent jamais, quelle que soit la concentration de glucose utilisée, de belles figures cristallines. Ce voile est toujours très organique; on y trouve une assez grande quantité de fer, de gypse et de chlorure de sodium; toutefois, il fait un peu effervescence à l'acide chlorhydrique, mais il reste, après cette attaque, un très important résidu. Les carbonates s'y trouvent essentiellement sous forme de microcristallisation. Ce n'est que dans les derniers voiles que l'on peut trouver quelques sphérolithes, qui sont généralement assez gros et isolés.

Par conséquent, non seulement de trop grandes concentrations d'eau de mer gênent la formation quantitative des voiles de carbonates, mais elles gênent le développement de belles formes cristallines. Comme on a vu précédemment que l'addition de sulfates divers n'empêchait pas la formation des cristaux et sphérolithes, on est amené à envisager que ce serait la concentration en chlorure de sodium qui gênerait le développement de certaines espèces bactériennes impliquées dans ce processus.

g) EAU DE MER CONCENTRÉE. — Les voiles recueillis en culture en eau de mer concentrée ont donné des résultats assez semblables à ceux obtenus dans les cultures de marais salants.

Fig. 30. — Variations des formes cristallines observées dans les viles successifs de cultures en eau de mer de diverses concentrations. B1, vase + eau de mer glucosée 0,5 %; B3, vase + eau de mer $\times 2$ glucosée 1 %; B5, vase + eau de mer $\times 3$ glucosée 1,5 %; B7, vase + eau de mer $\times 4$ glucosée 2 %.

B7	Fer. Fine cristall. confuse. Quelques sphérolithes. Gypse.	Fer. Petits cristaux. Quelques gros cristaux.	Fer. Microcr. Tendance à la sphérolith.	Fer. Gros cristaux. Gypse.	Fer. Microcrist. Gypse.
B5	Fer. Quelques cristaux. Tendance à la sphérolith.	Fer. Microcrist.	Fer. Microcrist.	Sphérolithes. Gros cristaux.	Petits cristaux et microcrist.
B3	Fer. Gros cristaux à tendance sphérolithique.	Fer. Fine crist. Sph. mal définis.	Beaux crist. Sph. Crist. second.	Beaux cristaux. Pas de sphérolithes.	Microcrist.
B1	Microcrist. et petits cristaux.	Sphérol. Microcrist. à tendance sphérol.	Sphérol. Fine cristal.	Sphérol.	« Vieux sphérolithes ». Microcristallisation.
	01	02	03	04	Jours de culture.

Le tableau donné figure 30 montre les différentes formes cristallines observées en fonction de la concentration de l'eau de mer.

Dans le b cher 1 où la culture est faite en eau de mer ordinaire, et qui sert de témoin, on observe, comme d'habitude, un début microcristallin, suivi rapidement, alors que la cristallisation est à son maximum, par une cristallisation sphérolithique caractéristique, pour redonner, en fin de cristallisation, une microcristallisation assez confuse.

Déjà, dans le b cher 3 qui contient de l'eau de mer de concentration double, on constate d'abord, dans les premiers voiles, une plus grande quantité de fer; les cristallisations sont moins nettes, et les sphérolithes rares.

Ces observations sont encore plus nettes dans le b cher 5 (eau de mer de concentration triple) où le fer est encore plus abondant et où l'on observe surtout des microcristallisations.

Le b cher 7 (eau de mer de concentration quadruple) ne donne que des images cristallines très confuses, noyées dans le fer, en majorité des plages de microcristallisation et quelques gros cristaux.

Les conclusions sont donc les mêmes que dans le cas des cultures en marais salants : les trop grandes concentrations d'eau de mer gênent le développement de belles formes cristallines, de même qu'elles ont g n  la formation du voile, du point de vue quantitatif.

h) STÉRILISATION. — La stérilisation de la vase ou de l'eau de mer influence la rapidité de formation du voile de carbonates, c'est pourquoi j'ai examiné tous les voiles formés dans les différentes conditions de stérilisation, pour voir si cela influençait aussi les formes de la cristallisation. Le tableau de la figure 31 résume ces observations. Je rappellerai que les erlenmeyers 9   12 contenaient de la vase noire stérile et de l'eau de mer glucosée, les erlenmeyers 17 à 20 de la vase noire et de l'eau de mer glucosée stérile, et les erlenmeyers 25 à 28 de la vase noire et de l'eau de mer glucosée.

Dans la première série, dont la cristallisation est plus lente et incomplète, on rencontre des voiles à formes cristallines très mélangées et confuses, mais où dominent nettement les formes microcristallines et cristallines, les formes sphérolithiques sont très rares.

Dans la deuxième série, où la cristallisation a été complète, mais légèrement retardée, les formes sont beaucoup plus nettes : on obtient d'assez nombreux sphérolithes et des cristaux bien formés, mais on a encore prédominance des formes en cristaux sur les formes sphérolithiques.

Dans la troisième série, qui est la série normale, le phénomène se déroule comme nous l'avons déjà vu, en débutant par une microcristallisation, ou par de très petits cristaux, pour être rapidement envahi par une cristallisation sphérolithique donnant de très belles plages coalescentes et des structures polygonales; ces plages de sphérolithisation sont parfois entourées d'une plage de microcristallisation secondaire qui épouse les formes extérieures de la plage de sphérolithisation.

On constate donc, une fois encore, que les agents qui ralentissent la cristallisation ou la gênent, ont pour effet d'empêcher la formation normale des sphérolithes.

i) VASES BEIGES. — La seule différence constatée entre le comportement des vases noires et des vases gris beige de Villefranche est un certain retard dans la formation des voiles pour ces dernières.

Microcristaux.		Cristaux.		« Vieux sph. » Microcrist.		Petits crist.	Micro- crist.	Petits cristaux.	Confus. Cristaux.	Crist.
9	Quelques gros cristaux.									
10	Id.		Id.		Id.	Id.	Id.	Id.	Id.	Id.
11	Id.		Id. + rares rhomboèdres.		Id.	Quelques sphér.	Id.	Id.	Id.	Id.
12	Id.		Quelques cristaux. Légère sphérol.		Id. Confus.	Sphérol. + crist.	Id.	Id.	Id.	Id.

17	Cristaux. Cristaux en rosette.	Crist. + sphér.	Sphér.	Crist. + sphér.	Sphér.	Sph. confus.	Cristaux + sphér.			
18	Cristaux. Struct. sphérol.	Id.	Id.	Id.	Micro.	Sph.	Sphér.			
19	Petits cristaux.	Id.	Id.	Id.	Sphér.	Sph. crist.	Cristaux.			
20	Cristaux.	Id.	Crist. + sphér.	Id.	Micro. + sphér.	Id.	Id.			

25	Petits cristaux.	Cristaux.	Sph.	Sph.	Sph. — micro. sec					
26	Id.	Sphérol. + crist.	Id.	Id.	Id.					
27	Id.	Id.	Id.	Id.	Id.					
28	Id.	Id.	Id.	Id.	Id.					

Fig. 31. — Variations des formes cristallines observées dans les voiles successifs de cultures plus ou moins stériles.
I, vase stérile + eau de mer glucosée; II, vase noire + eau de mer glucosée stérile; III, vase noire + eau de mer glucosée.

Fig. 32. — Comparaison entre les formes cristallines observées dans les voiles successifs de cultures, à partir de vase noire et de vase beige.

Vase beige stérile, eau de mer gluc.	Fine crist. Fer.	Cristaux, légère sphérol. Fer.	Fer, mal cristallisé.	Fer, mal cristal.	
Vase noire stérile, eau de mer gluc.	Microcrist. Quelques gros cristaux.	Cristaux, légère sphérol.	Vieux sphér. Microcr.	Petits crist. Micro.	Confus. Cristaux.
					Crist.
Vase beige + e. m. gluc. stérile.	Petits rhomboèd.	Sphér. + gr. crist.	Sphér. + micro. second.	Microcr. + sphérol.	Sphér. + crist. second.
Vase noire + e. m. gluc. stérile.	Cristaux. Crist. + sphér.	Sphér. Crist. + sphér.	Micro. + sphér.	Sph. confus.	Cristaux et sphérolithes.
Vase beige + e. m. gluc.	Fer, petits crist.	Sphér. Crist. sec.	Sph. coal. mal crist.	Confus	Vieux sph. crist.
V. noire + e. m. gluc.	Petits crist. Cristaux.	Sphér. Cristaux.	Sph. Sph.	Sphérol. + micro. second.	
Aq. III v. beige.	Fer. Sphérolithes.	Sph. confus.	Sph. + crist. conf.	Micro. petits sph.	Sph. Sph. + Micro. et sph.
Aq. I v. noire.	Fer.	Sphérolithes et petits cristaux.	Sph. Micro. second.	Sph. Sph.	Sph. + micro. second.
					Jours de culture.

Parallèlement au travail qui a été fait sur les aquariums de vase noire, j'ai étudié, au microscope, les voiles formés dans l'aquarium contenant de la vase beige et de l'eau de mer glucosée. La partie inférieure du tableau donne les résultats de ces observations (fig. 32).

L'aquarium I est celui de référence, contenant de la vase noire, et l'aquarium III contient de la vase beige.

Alors que l'aquarium I nous donne assez rapidement des images sphérolithiques très belles, à structure polygonale, on observe dans les voiles de l'aquarium III une cristallisation beaucoup plus confuse, où sont souvent mélangées les différentes sortes de cristallisation; d'autre part, chaque sorte de cristallisation est beaucoup moins belle que dans les frottis des voiles de l'aquarium I.

Donc, là encore, le ralentissement du phénomène donne de moins belles formes cristallines.

La partie supérieure du tableau (fig. 32) donne des indications sur la cristallisation en milieu plus ou moins stérile, comme cela a été exposé, pour la vase noire, dans le paragraphe précédent.

Ces expériences confirment les résultats obtenus avec la vase noire; en effet, dans chaque série, la cristallisation est nettement moins belle plus le phénomène est retardé; cela confirme aussi que, toutes choses égales d'ailleurs, les cristallisations à partir de vase beige sont moins belles qu'à partir de vase noire; ceci est très net dans la série vase stérile/eau de mer, où, alors que l'on pouvait noter une cristallisation incomplète, mais assez bien déterminée dans la vase noire, dans la vase beige, on ne trouve que très peu de particules cristallines; tous les voiles sont formés en majorité d'hydroxyde de fer, aucun de ces voiles ne fait d'ailleurs une forte effervescence à l'acide chlorhydrique.

On peut en conclure que les vases beiges ont le même comportement que les vases noires, la seule différence révélée par l'examen des voiles est l'existence d'une plus grande quantité d'hydroxyde de fer dans les premiers voiles des cultures de vases beiges et des formes moins nettes de cristallisation dans les voiles suivants.

j) VASE DE LA ROCHELLE. — Comme on l'a vu plus haut, les vases de La Rochelle, mises dans les mêmes conditions que les vases de Villefranche, se comportent de la même façon quant à la précipitation des carbonates. Les voiles successifs ont été recueillis et ont donné les résultats suivants :

Premier voile, après neuf jours de culture : ce voile se présente macroscopiquement comme très ferrugineux et peu cristallin; l'examen microscopique le confirme; il ne contient que très peu de microcristallisation, il fait d'ailleurs très peu effervescence à l'acide chlorhydrique, et présente une très grande abondance d'hydroxyde de fer.

Le deuxième voile, après treize jours de culture, est beaucoup plus blanc et fait une forte effervescence à l'acide, il est formé de gros sphérolithes opaques coalescents et de quelques cristaux.

Le troisième voile, après dix-sept jours de culture, est entièrement sphérolithique.

Le quatrième voile, après vingt-quatre jours, est un mélange de sphérolithes coalescents et de microcristallisation.

Le cinquième voile, qui n'a été récolté que soixante jours après la mise en culture, présente des sphérolithes coalescents, et une fine cristallisation à tendance sphérolithique sur les bords des plages.

Il est donc inutile de s'étendre plus avant sur ces formes cristallines qui sont sensiblement les mêmes que pour les vases de Villefranche; la présence abondante de fer a été déjà signalée pour les vases beiges de Villefranche, et les cristallisations sont, comme dans ces vases beiges, un peu plus confuses et moins caractéristiques.

II. — ÉTUDE AUX RAYONS X

Devant la complexité du problème minéralogique qui s'est révélé à l'examen microscopique, et devant la quantité de voiles recueillis dans diverses conditions (environ 700), j'ai été obligée de procéder plutôt à des sondages aux rayons X qu'à une étude systématique.

Il est évident que l'abondance de matériel divers, d'une part, et les résultats des analyses aux rayons X, d'autre part, nous amènent à envisager, dans un travail ultérieur, une étude beaucoup plus approfondie des formes cristallines obtenues en fonction des différents facteurs variables.

Les quelques diagrammes que j'ai pu obtenir n'ont cependant pas été entièrement faits au hasard, et j'ai essayé d'ébaucher le plan de ces recherches futures :

1° EVOLUTION D'UN VOILE. — On a vu que, dans presque tous les cas, les voiles se formaient au début par une microcristallisation confuse, suivie assez rapidement par une sphérolithisation dans les voiles suivants.

Dans le cas le plus simple, qui est celui d'une vase noire de Villefranche, recouverte d'eau de mer glucosée à 0,5 % et laissée à la lumière du jour, j'ai fait faire les diagrammes de deux voiles typiques. Le premier voile, obtenu après vingt et un jours de culture, qui, au microscope, montrait une microcristallisation très fine, noyée encore dans l'hydroxyde de fer, s'est montré, aux rayons X, formé de calcite pure.

Le sixième voile, recueilli dans le même aquarium après quarante-trois jours de culture, formé uniquement de sphérolithes coalescents à structure polygonale est, par contre, formé uniquement d'aragonite.

2° VIEILLISSEMENT « EN PLACE » D'UN VOILE. — Au cours d'une expérience sur l'aération et sur le rôle du CO_2 , j'ai, comme on l'a déjà vu, mis en culture deux aquariums identiques : dans l'un, le voile était écumé au fur et à mesure de sa formation; dans l'autre, il a été laissé intact.

Le quarantième jour de culture, les deux voiles ont été récupérés, dans le premier aquarium c'était le dixième voile recueilli, il était formé de sphérolithes opaques, à belles zones d'accroissement hyalines et un ciment soit microcristallin, soit formé par de petits sphérolithes hyalins de deuxième génération; les rayons X ont révélé la présence d'aragonite et de dolomie. Dans le deuxième aquarium, on se trouvait en présence d'un voile qui n'avait pas été touché depuis le début de la culture, il était très épais, très impur et formé essentiellement de sphérolithes coalescents et d'une microcristallisation secondaire, il est aussi formé de dolomie et d'aragonite, mais on peut aussi, sur le diagramme, distinguer les raies les plus intenses de la calcite.

3° ADDITION DE DIVERS SULFATES. — Lorsqu'on ajoute du sulfate de magnésium à des cultures, on a vu que cela influe sur la quantité de voile formé s'il y a du CO_2 en suffisance, mais que les formes cristallines sont pratiquement les mêmes. Les diagrammes de rayons X confirment les données microscopiques, on obtient un mélange de dolomie et d'aragonite dans les deux cas.

Dans l'aquarium où l'on a ajouté du sulfate de fer pour voir s'il était possible d'obtenir de la sidérose, on n'a pu en trouver aux rayons X; le diagramme est un diagramme de calcite et d'un peu de dolomie; au microscope, la cristallisation n'était pas très nette, les sphérolithes étaient mal formés, reconnaissables uniquement à l'existence de croix noires en lumière polarisée; le fer a certainement été entièrement réduit en monosulfure de fer à sa libération dans l'eau de mer.

4° ACTION DE LA TEMPÉRATURE. — Là encore, nous devons nous contenter de quelques diagrammes faits sur des voiles formés à diverses températures :

A 50° , le deuxième voile après cinq jours de culture est formé de gros cristaux et de sphérolithes très mal délimités, mais présentant des croix noires; aux rayons X, on trouve de la calcite et de la dolomie.

A 60° , le deuxième voile après dix jours de culture est formé d'une fine microcristallisation et le diagramme indique aussi la présence de calcite et de dolomie.

Il en est de même à 70° .

S'il n'est pas trop présomptueux de parler de conclusions avec si peu de données précises, il semble tout de même que, dans les conditions normales de formation, on peut considérer que la première cristallisation (microcristallisation en règle générale) soit de calcite, et que lorsqu'on obtient des sphérolithes on se trouve le plus souvent en présence d'aragonite. Il semble, d'autre part, que la dolomie ne se présente pas dans les tout premiers voiles, ce qui indiquerait que les bicarbonates de magnésium seraient plus stables que ceux de calcium.

L'augmentation de température qui accélère la formation du voile, mais ne lui permet généralement pas de se former entièrement, gêne le développement de formes sphérolithiques et on n'obtient que des diagrammes de calcite et de dolomie, ce qui correspond bien à l'hypothèse précédente faisant des sphérolithes de l'aragonite.

Il est à noter, d'autre part, que, sauf dans l'aquarium où l'on a laissé le voile se former pendant quarante jours sans y toucher, et où on a eu les trois formes de carbonates, dans tous les autres diagrammes on n'a jamais ensemble cristallisation de calcite et d'aragonite.

CONCLUSIONS

L'ensemble des résultats, que j'ai pu obtenir par les expériences et les observations précédentes, vérifie donc l'hypothèse que j'ai avancée page 217. La précipitation bactérienne des carbonates est due, en grande partie, à l'activité des bactéries sulfato-réductrices qui réduisent les sulfates présents dans l'eau de mer. Les ions Ca^{++} et Mg^{++} , au contact du gaz carbonique dégagé par la vie bactérienne se développant aux dépens des substances organiques carbonées (glucose, cellulose, etc.), donnent des bicarbonates solubles. En surface, lorsque la tension en CO_2 diminue, il se forme des carbonates cristallins. Parallèlement, la libération de SH_2 dans un milieu contenant des cations de bases

fortes permet de faire monter le pH à 8 environ, ce qui permet la transformation CO_3H^- en $\text{CO}_3^{=}$ et, par conséquent, la précipitation de CO_3Ca .

D'après les études aux rayons X de la composition du voile au fur et à mesure de sa formation, il semble que les plages de microcristallisation correspondraient le plus souvent à de la calcite, et les sphérolithes à de l'aragonite ou de la dolomie.

La dolomie n'est jamais présente dans les premiers voiles. Ceci est dû à ce que les carbonates de magnésium sont plus solubles que les carbonates de calcium; donc, d'après la loi de Berthollet, les sels les plus solubles cristallisant en premier lieu, on a d'abord une cristallisation pure de carbonates de calcium, suivie d'une cristallisation mixte.

Etant donnée la fréquence des associations fer/calcaire dans la nature, il est nécessaire d'insister un peu sur ce sujet. Tout au long des expériences que je viens de décrire, les premiers voiles recueillis montraient de fortes teneurs en fer. Le tout premier voile même, dans presque tous les cas, était composé en majorité d'hydroxyde de fer. Si on n'écume pas ce voile et qu'on le laisse en place lors du dégagement d'hydrogène sulfuré, il ne tarde pas à noircir et se transforme en monosulfure de fer très instable. Mais on peut imaginer que, dans la nature, il peut être mis dans des conditions d'anaérobiose et de pression telles qu'avec le temps il puisse se transformer en pyrite.

Ce fer, dans les cultures qui nous intéressent, joue le rôle de tampon, en fixant l'excès d' H_2S qui se dégage et empêche ainsi le milieu de devenir trop acide, ce qui serait néfaste pour la formation des carbonates.

Si, lorsqu'une culture aquarium a terminé sa précipitation de carbonates, on enlève l'eau de mer et on la remplace par une autre quantité d'eau de mer glucosée, le phénomène de précipitation du carbonate reprend; mais, dans ce cas, il n'est pas précédé par la concentration du fer. Ces résultats indiquent donc que c'est le fer de la vase qui est concentré, ou plutôt extrait, et non le fer de l'eau de mer, si tant est qu'il existe.

La présence de matière organique en assez grande quantité est absolument nécessaire à la formation des carbonates; j'ai, en effet, montré dans plusieurs séries d'expériences combien, aussi bien la pauvreté qu'un excès de richesse en matière organique pouvaient gêner la formation des carbonates. La pauvreté empêche cette formation, car le métabolisme bactérien devient impossible et, de ce fait, il n'y a plus, dans le milieu, assez de CO_2 pour se combiner au calcium et au magnésium, et l'excès rend le milieu beaucoup trop acide pour qu'on puisse envisager la formation de carbonates. Il est évidemment difficile de préciser quels sont, en réalité, les besoins en matière organique, sinon en les donnant en équivalent de glucose. Les meilleurs rendements ont été obtenus avec des quantités allant de 0,5 à 1 g de glucose pour 100 cm³ d'eau de mer.

Une autre condition favorable est une bonne aération. En effet, si la surface de la culture est obstruée artificiellement par une couche d'huile de vaseline, ou naturellement par un voile épais déjà formé, il ne se forme plus de carbonates, le gaz carbonique en excès ne pouvant plus être évacué.

Si l'on essaye de déterminer quelles pourraient être les conditions optima de formation de carbonates, d'après la série d'expériences précédentes, on peut affirmer que ce sont les suivantes :

1° Présence de matière organique assimilable en assez grande quantité. Il semble, toutefois, qu'il est préférable que celle-ci ne soit pas sans cesse renouvelée, afin de ne pas créer des conditions trop acides.

2° Températures assez élevées (entre 30 et 40°).

3° Lumière et ensoleillement maximum, par conséquent ce phénomène doit se développer préférentiellement dans les eaux peu profondes.

4° De préférence eaux calmes et peu renouvelées.

Ces conditions semblent se réaliser idéalement dans les lagunes et parties de la mer peu en rapport avec le large, dans les régions tropicales où les conditions de température et d'ensoleillement sont optima.

L'existence d'un tel phénomène dans la nature pourrait être une explication des dépôts calcaires dépourvus d'organismes, et même de débris d'organismes dont l'origine est encore obscure, telle la matrice de la craie.

La formation, dans ces cultures à petite échelle, de très beaux sphérolithes, nous amène à envisager un rapprochement avec les calcaires oolithiques ou pisolithiques, souvent ferrugineux.

En effet, dans de nombreux cas, j'ai pu observer au microscope des sphérolithes très bien formés, avec de belles zones de croissance concentriques bien marquées, à structure fibreuse, ressemblant énormément aux coupes d'oolithes (planche III).

Plusieurs questions restent en suspens à la fin de ce travail. Parmi les plus importantes, je pourrais signaler :

Une étude minéralogique approfondie des différents voiles pour tâcher de trouver quelle est la règle qui régit la répartition de la calcite, de l'aragonite et de la dolomie, puisque ces trois formes ont pu être obtenues.

Une étude de la suite des réactions, après la fin de la précipitation du carbonate : quel est le rôle exact des bactéries pourpres qui envahissent les cultures dès que le pH atteint 8 ?

Enfin, tout en conservant la même ligne de recherches, c'est-à-dire en s'éloignant le moins possible des conditions naturelles, il serait intéressant de pouvoir préciser quelles sont les bactéries responsables de ces phénomènes.

BIBLIOGRAPHIE

1927. ARCHANGUESKY (A. D.). — On the black sea sediments and their importance for the study of sedimentary rocks. *Bull. Soc. Nat. Moscou, Sect. Geol.*, V.
1937. BAIER (C. R.). — Die Bedeutung der Bakterien für den Kalktransport in der Gewässern. *Geol. d. Meere u. Binnengewasser*, 1, pp. 75-105.
1931. BAVENDAM (W.). — Die Frage der Bakteriologischen Kalkfällung in der tropischen See. *Ber. d. Deut. Bot. Ges.*, XLIX, pp. 282-287.
1932. BAVENDAM (W.). — Die Mikrobiologische Kalkfällung in der tropischen See. *Arc. f. Mikrob.*, III, pp. 205-276.
1919. BERKELEY (C.). — A study of Marine bacteria, Straits of Georgia. *B. C. Trans. Roy. Soc. Canada*, sér. 3, sect. 5, 13, pp. 15-43.
1953. BLACK (M.). — The precipitation of calcium carbonate on the Great Bahamas Bank. *Geol. Mag.*, vol. 70, pp. 455-466.
1955. BOURCART (J.). — Géologie sous-marine de la baie de Villefranche. *Ann. Inst. Océan.* XXXIII, pp. 137-200.

1918. BRUSSOF (A.). — Ueber ein stabchenformige, kalkspeichernd Eisen bakterie aus der Klärschlamm einer biologischen Abwasserkläranlage. *Centralbl. Bakt.*, II, XLVII, pp. 193-210.
1933. BRUSSOF (A.). — Ueber ein kieselbakterium. *Arc. f. Mikrob.*, IV, 1.
1933. BRUSSOF (A.). — Sur une bactérie accumulant du calcaire et sur les cristaux qu'elle forme. *Arc. f. Mikrob.*, IV, pp. 170-188.
1935. CAYEUX (L.). — Les roches sédimentaires de France. Roches carbonatées. Paris. Masson.
1918. DOLE CHAMBERS. — Salinity of Ocean Water at Fowey Rocks. *Carn. Inst. Wash. Pub.*, 213, 315.
1910. DREW (G. H.). — The action of some denitrifying bacteria in Tropical and temperate seas, and the bacterial precipitation of calcium carbonate in the sea. *Journ. Mar. Biol. Assoc.*, vol. IX, n. s., pp. 142-155.
1910. DREW (G. H.). — On the precipitation of calcium carbonate in the sea by marine bacteria, and on the action of denitrifying bacteria in tropical and temperate seas. *Journ. Mar. Biol. Assoc.*, vol. IX, n. s., pp. 479-523.
1913. DREW (G. H.). — Investigations on marine bacteria at Andros Island, Bahamas. *Year Book n° 11 Carnegie Inst. Wash.*, pp. 136-144.
1950. FAIRBRIDGE (R. W.). — Recent and pleistocene coral reefs of Australia. *Journ. of Geol.*, vol. 58, n° 4, pp. 330-401.
1931. FIELD (R. M.). — Geology of the Bahamas. *Bull. Geol. Soc. of America*, 42, pp. 193-194.
1929. FIELD et FISH. — The Princeton Buffalo Expedition to west Indies. *Science*, XIX, pp. 222-223.
1948. FRANCIS-BŒUF (C.). — Sur la possibilité de concevoir une physiologie des sédiments marins. *Bull. Mus. Hist. Nat. de Marseille*, VIII, n° 1, pp. 39-43.
1933. GALLIHER (E. W.). — The sulfur cycle in sediments. *Journ. Sed. Petr.*, 3, pp. 51-63.
1921. GICKLHORN (J.). — Morphologie et microchimie d'un nouveau groupe de bactéries pourpres. *Ber. D. Deutsch. Bot. Ges.*, XXXIX, pp. 312-319.
1923. GLOCK (W. S.). — Algæ as limestone makers and climatic indicators. *Am. Journ. of Science*, 6, pp. 377-408.
1916. JOHNSTON, WILLIAMSON et MERWIN. — The several forms of calcium carbonate. *Am. Journ. of Science*, 11, pp. 505-506.
1916. JOHNSTON et WILLIAMSON. — The rôle of inorganic agencies in the deposition of calcium carbonate. *Journ. Geol.*, vol. XXIV.
1932. KALANTARIAN (P.) et PETROSSIAN (A.). — Ueber ein neues kalkfällendes bakterium aus dem Sewan-See (Goktschassee). *Centralbl. f. Bakt.*, II, Abt. 85, pp. 431-436.
1915. KELLERMAN (K. F.). — Relation of bacteria to deposition of calcium carbonate. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 26, 58.
1914. KELLERMAN (K. F.) et SMITH (N. R.). — Bacterial precipitation of calcium carbonate. *Journ. Wash. Acad. Sci.*, 4, pp. 400-402.
1916. KELLERMAN (K. F.) et SMITH (N. R.). — Halophytic and lime precipitating bacteria. *Centralbl. f. Bakt.*, II, Abt. 45, p. 371.
1954. LALOU (C.). — Sur la précipitation expérimentale de la calcite dans les vases de la baie de Villefranche-sur-Mer. *C. R. Acad. Sc.*, t. 238, pp. 603-605.
1954. LALOU (C.). — Sur les formes cristallines observées dans les voiles calcaires formés par cultures bactériennes à partir de vases noires de la baie de Villefranche-sur-Mer. *C. R. Acad. Sc.*, t. 238, pp. 2329-2330.
1954. LALOU (C.). — Sur un mécanisme bactérien possible dans la formation des dépôts de carbonates dépourvus d'organismes. *C. R. somm. Soc. Géol.*, séance du 29 nov.
1938. LEGENDRE (R.). — La corrosion à la mer. *Rev. Scient.*, 15 avril.
1924. LIPMAN (C. B.). — Etude critique et expérimentale de l'hypothèse de Drew relative à la précipitation du carbonate de calcium dans la mer. *Papers from the Dept. of Mar. Biol. Wash.*, XIX, pp. 179-199.
1929. LIPMAN (C. B.). — Further studies on marine bacteria with special references to the Drew hypothesis on CaCO_3 precipitation in the sea. *Carnegie Inst. Wash.*, 26, p. 251.
1939. MANIGAULT (P.). — Recherches sur le calcaire chez les mollusques, phosphatase et précipitation calcique. Histochemie du calcium. *Ann. Inst. Océan.*, n. s., t. XVIII, fasc. 5.

1934. MOBERG, GREENBERG, REVELLE et ALLEN. — The buffer mechanism of sea water. *Bull. Scripps. Inst. Ocean. Techn.*, ser. 3, pp. 231-278.
1924. MOLLISCH (H.). — Ueber kalkbakterien und andere kalkfallende Pilze. *Centralbl. f. Bakt.*, II, Abt. 65, pp. 130-139.
1889. MURRAY (A. N.) et IRVINE (R.). — On coral reefs and other carbonate of lime formation in modern seas. *Proc. Roy. Soc. Edinburgh*, 17, pp. 79-109.
1929. MURRAY (A. N.) et LOVE (W. W.). — Action of organic acids upon limestone. *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.*, 13, pp. 1467-1475.
1904. NADSON (S.). — Die Mikroorganismen als geologische faktoren. I. Ueber die Schwefelwasserstoffgahrung im Weissowoo Salzee und ueber die Betheiligung der mikroorganismen bei der Bildung des schwarzen Schlammes (Heilschlammes). *Abstract in Bat. Centralbl.*, 96, pp. 591-593.
1904. NADSON (S.). — Beitrag zur Kenntis der Bakteriogenen kalkablagerungen. *Arch. f. Hydrobiol.*, 19, pp. 154-164.
1954. NICOLESCO (C. P.). — Observations sur l'origine de la craie. *C. R. Acad. Sc.*, 8 mars.
1927. PRENANT (M.). — Les formes minéralogiques du calcaire chez les êtres vivants et le problème de leur déterminisme. *Biological review*, II, pp. 365-393.
1927. PRENANT (M.). — Recherches sur le calcaire chez les êtres vivants. La stabilité du calcaire amorphe et le tégument des crustacés. *Ann. Physiol. et Physico-Chim. Biol.*, V, pp. 818-844.
1928. PRENANT (M.). — Contribution à l'étude cytologique du calcaire. La vaterité chez les animaux. *Bull. Biol. Fr. Belg.*, LXII, pp. 21-50.
1929. PRENANT (M.). — Les formes minéralogiques du calcaire chez les êtres vivants et leur déterminisme. *Bull. Soc. Philom. Paris*, série 10, XVIII, 18.
1930. PRENANT (M.). — Le polymorphisme du calcaire, problème biologique. *Ann. et Bull. Soc. Roy. Sc. Méd. Nat. Bruxelles*, pp. 31-41.
1941. RITTENBERG (S. C.). — Studies on marine sulphate reducing Bacteria. *Dissertation, University of California*.
1939. RIVIÈRE (A.). — Sur la dolomitisation des sédiments calcaires. *C. R. Acad. Sc.*, 209, p. 597.
1939. RIVIÈRE (A.). — Observations nouvelles sur le mécanisme de la dolomitisation des sédiments calcaires. *C. R. Acad. Sc.*, 209, p. 691.
1940. RIVIÈRE (A.). — L'eau de mer et les sédiments calcaires. *C. R. Soc. Géol. de France*, 40.
1941. RIVIÈRE (A.). — Sur la réserve alcaline et les carbonates de l'eau de mer. *C. R. Soc. Géol. de France*, 19.
1942. RIVIÈRE (A.). — Données expérimentales sur les conditions physico-chimiques de la sédimentation ferrugineuse en milieu marin. *C. R. Soc. Géol. de France*, 200.
1918. SKEATS (E. W.). — The formation of dolomite and its bearing on the coral reef problem. *Am. Journ. of Science*, 4th ser., vol. 45, pp. 185-200.
1926. SMITH (N. R.). — Rapport sur un examen bactériologique des boues calcaires et d'eau de mer provenant des bancs de Bahama. *Papers from Dept. of Marine. Biol. Wash.*, XXIII, pp. 67-72.
1951. STOLKOWSKI (J.). — Essai sur le déterminisme des formes minéralogiques du calcaire chez les êtres vivants. *Ann. Inst. Océanogr.*, t. 26, fasc. 1.
1940. TIXIER-DURIVAUT (A.). — Contribution à l'étude du métabolisme du calcaire et du fer chez l'*Alcyonium palmatum Pallas*. *Ann. Inst. Océanogr.*, n. s., t. 20.
1950. TWENHOFEL (W. H.). — Treatise on sedimentation. 2nd edit.
1924. VAUGHAN. — Oceanography in its relation to other earth science. *Journ. Wash. Acad. Sci.*, 14, pp. 307-333.
1934. WILLIAMS (F.) et Mc Coy (E.). — On the role of microorganisms in the precipitation of calcium carbonate in the deposits of fresh water lakes. *Journ. Sed. Petrology*, 4, pp. 113-126.
1947. WINOGRADSKY (S.). — Principe de la microbiologie œcologique. *Anton. van. Leeuwenhoek*, 12.
1946. ZOBELL (C.). — Marine Microbiology. *Waltham Mass. U. S. A.*
- STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER POLLUTION AND SEWAGES. *Public Health Association, U. S. A.*

EXPLICATIONS DES PLANCHES

PLANCHE 11

Formes cristallines observées dans le b cher 1.
(Grossissement : environ 500 fois.)

1. Frottis 1109. — Zones de microcristallisation.  l ments ronds, probablement début de sphérolithes.
2. Frottis 1115. — Beaux cristaux isolés.
3. Frottis 1121. — Zones de cristallisation confuse d'où s'individualisent des sphérolithes. Quelques gros cristaux.
4. Frottis 1127. — Gros cristaux et sphérolithes bien formés.
5. Frottis 1147. — Zone de microcristallisation et sphérolithes coalescents.

PLANCHE 12

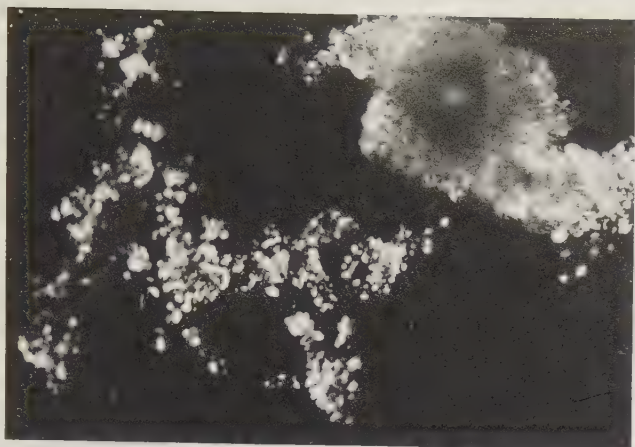
Formes cristallines observées dans le b cher 2.
(Grossissement : environ 500 fois.)

1. Frottis 1116. — Belles formes cristallines.
2. Frottis 1118. — Belles formes cristallines.
3. Frottis 1126. — Zones de microcristallisation d'où s'individualisent des sphérolithes.
4. Frottis 1120. — Association de gros cristaux et de sphérolithes.
5. Frottis 1132. — Beaux sphérolithes et fine cristallisation.

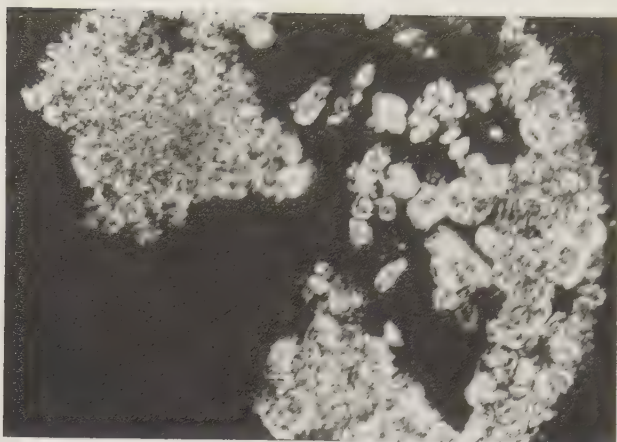
PLANCHE 13

Comparaison entre des formes observées au cours de la formation des voiles à partir de cultures bactériennes, et une plaque mince de calcaire oolithique.

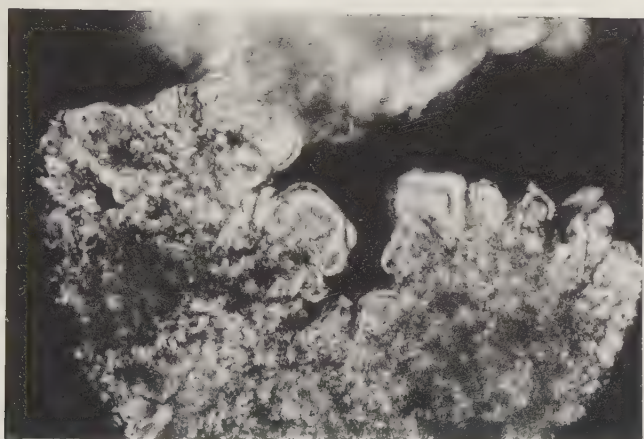
1. Frottis 383. — Vase noire + eau de mer + citrate de fer ammoniacal, 8  voile après trente-deux jours de culture à la lumière du jour. ($\times 500$.)
2. Frottis 286. — Vase noire + eau de mer glucosée stérile, 4  voile après vingt-deux jours de culture à la lumière du jour. ($\times 500$.)
3. Frottis 295. — Vase beige + eau de mer glucosée, 4  voile après vingt-deux jours de culture à la lumière du jour. ($\times 500$.)
4. Plaque V, 41. — Calcaire oolithique. ($\times 100$.)



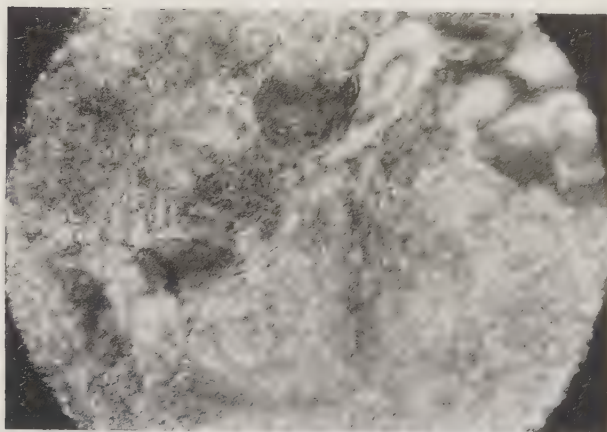
1



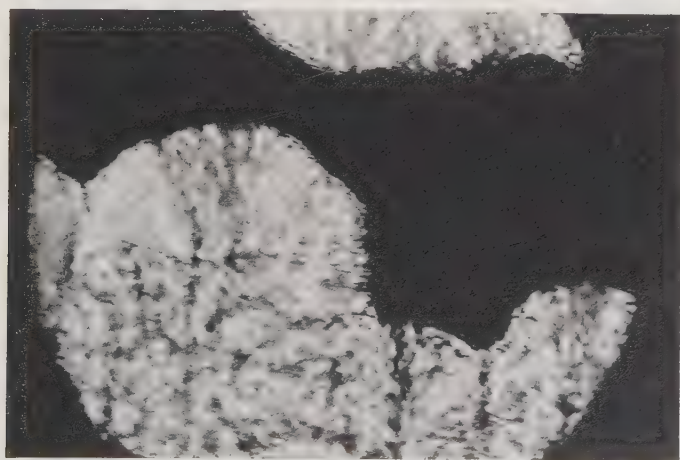
2



3



4

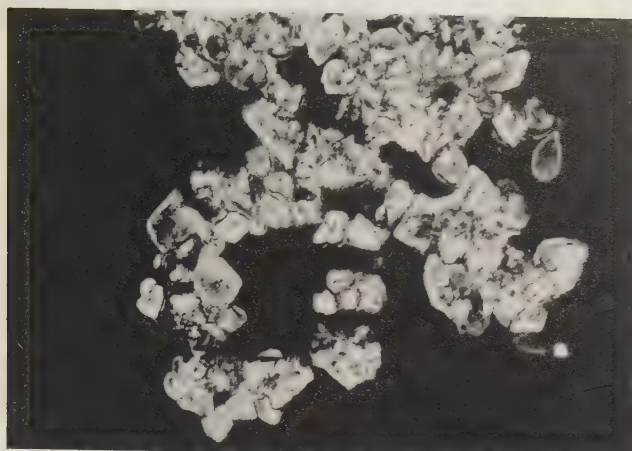


5

A. Barry imp., Paris

Cl. Leloué phot.

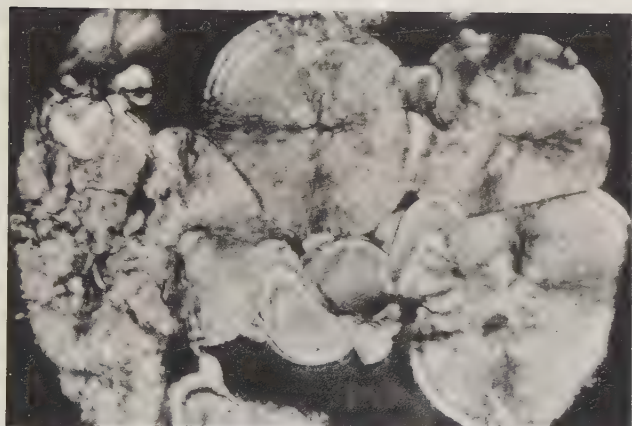
FORMES CRISTALLINES OBSERVÉES DANS LE BÉCHER 1.



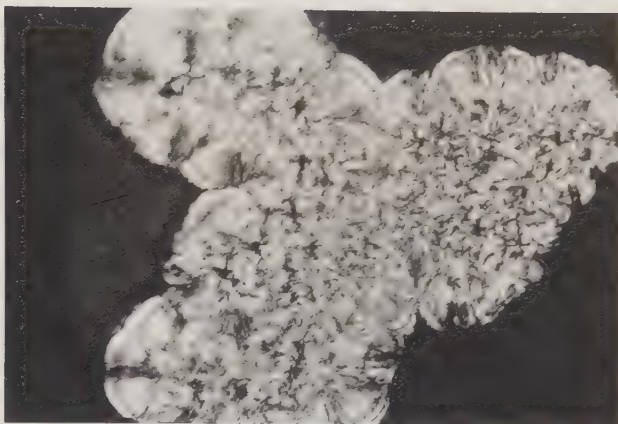
1



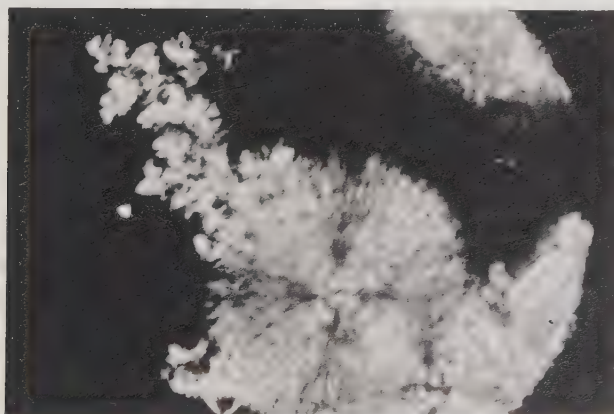
2



3



4

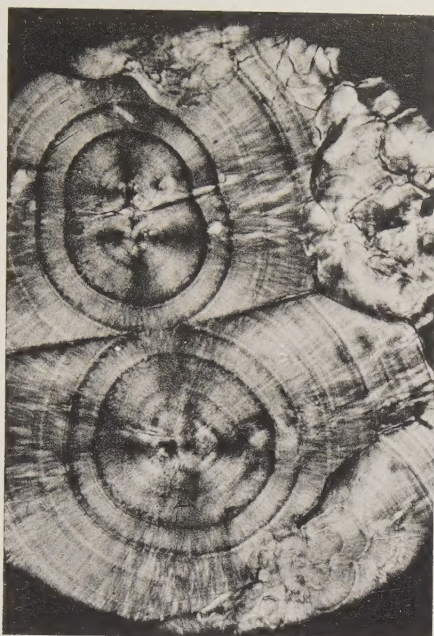


5

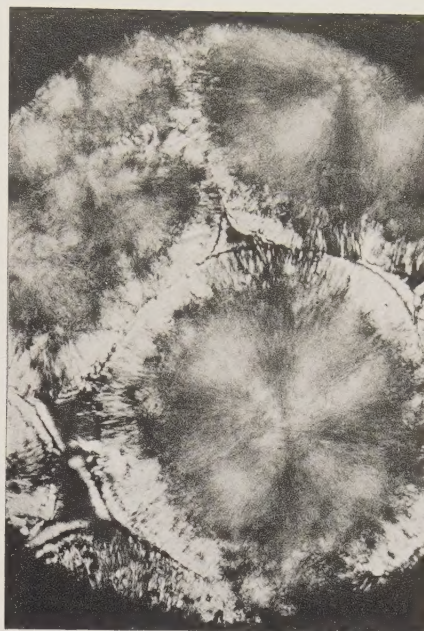
A. Barry imp., Paris

Cl. Lalou phot

FORMES CRISTALLINES OBSERVÉES DANS LE BÉCHER 2.



1

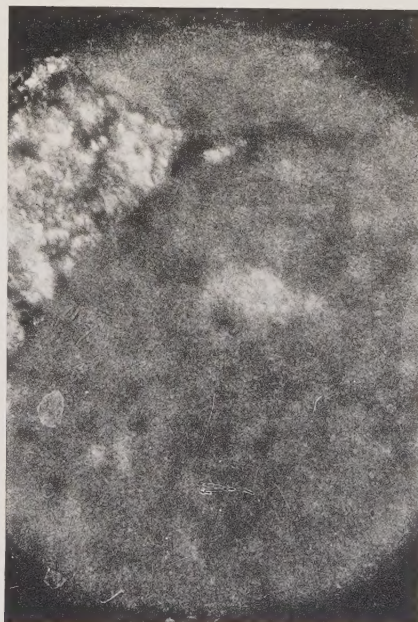


2



A. Barry imp., Paris

3



4

Cl. Lalou phot.

COMPARAISON ENTRE LES FORMES SPHEROLITHIQUES OBTENUES
ET LES CALCAIRES OOLITHIQUES

